

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA DE CIPRÉS (*CUPRESSUS SEMPERVIRENS*) PARA SU APLICACIÓN EN CONSTRUCCIÓN MEDIANTE MODELOS PREDICTIVOS

OPTIMIZATION OF THE DRYING PROCESS OF CYPRESS WOOD (*CUPRESSUS SEMPERVIRENS*) FOR ITS APPLICATION IN CONSTRUCTION THROUGH PREDICTIVE MODELS

Estefani Catherine Rojas Vallejo¹, María Isabel Uvidia Fassler², María Fernanda Rojas Vallejo³,
Michelle Caroline Bonilla Coca⁴

{erojval@upv.edu.es¹, muvidia@unach.edu.ec², mfrojas@unach.edu.ec³, michelle.bonilla@unach.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 11/11/2024 / Fecha de aceptación: 30/11/2024 / Fecha de publicación: 2/12/2024

RESUMEN: Este estudio investigó el proceso de secado de la madera de *Cupressus sempervirens* mediante convección con aire caliente, un material importante en la construcción. El propósito fue analizar cómo varía el Porcentaje de Humedad Remanente (PHR) durante el proceso de secado, bajo tres temperaturas distintas (70, 80 y 90 °C) y con una velocidad de aire constante de 2 m/s. Se emplearon los modelos matemáticos de Newton-Lewis y Midilli para ajustar y prever el comportamiento del PHR. Los resultados indicaron que los valores del PHR se ajustaron correctamente a ambos modelos, lo que permitió controlar el proceso de secado de manera efectiva, preservando las propiedades físicas y estructurales de la madera. Estos modelos demostraron ser útiles para evitar un secado excesivo, manteniendo las características originales de la madera. Además, su simplicidad facilitó la gestión del proceso, lo cual es crucial para optimizar la calidad de la madera destinada a la construcción. El estudio también identificó que al utilizar estos modelos matemáticos no fue necesario realizar numerosos experimentos físicos, lo que redujo considerablemente el tiempo y los costos asociados al proceso. Esto resultó en una mayor eficiencia y sostenibilidad en la industria del secado de madera, al mismo tiempo que se mejoró la calidad del material. Los resultados sugieren que los modelos matemáticos de Newton-Lewis y Midilli son herramientas altamente efectivas y económicas para controlar el proceso de secado de la madera de *Cupressus sempervirens*. Estos modelos permiten predecir de manera precisa el comportamiento de la humedad durante el secado, lo que facilita la optimización de este proceso. Al aplicar estos modelos, se puede regular el secado de forma eficiente, evitando el deterioro de la madera debido a un secado excesivo o insuficiente, garantizando que la madera cumpla con los altos

¹Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0009-0002-7818-9184>.

²Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0000-0001-7862-4460>.

³Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-7105-5530>.

⁴Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), Riobamba-Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-3247-8995>.

estándares de calidad requeridos en la industria de la construcción, reduciendo los costos asociados a procesos de secado ineficientes y mejorando la sostenibilidad en el uso de recursos.

Palabras clave: Cinética de secado, Cupressus Sempervirens, modelo de secado de Newton-Lewis, modelo matemático Midilli

ABSTRACT: This study investigated the drying process of *Cupressus sempervirens* wood using hot air convection, a material important in construction. The aim was to analyze how the Remaining Moisture Percentage (RMP) varies during the drying process, under three different temperatures (70, 80, and 90 °C) and with a constant air velocity of 2 m/s. The Newton-Lewis and Midilli mathematical models were used to adjust and predict the behavior of the RMP. The results indicated that the RMP values fit both models accurately, allowing effective control of the drying process while preserving the physical and structural properties of the wood. These models proved useful in preventing excessive drying, maintaining the original characteristics of the wood. Additionally, their simplicity facilitated process management, which is crucial for optimizing the quality of wood intended for construction. The study also identified that using these mathematical models eliminated the need for numerous physical experiments, significantly reducing the time and costs associated with the process. This resulted in greater efficiency and sustainability in the wood drying industry, while also improving the quality of the material. The results suggest that the Newton-Lewis and Midilli mathematical models are highly effective and cost-efficient tools for controlling the drying process of *Cupressus sempervirens* wood. These models allow for precise prediction of moisture behavior during drying, facilitating the optimization of the process. By applying these models, the drying process can be regulated efficiently, preventing wood deterioration due to over- or under-drying, ensuring the wood meets the high-quality standards required in the construction industry, reducing costs associated with inefficient drying processes, and improving sustainability in resource usage.

Keywords: Drying kinetics, Cupressus Sempervirens, Newton-Lewis drying model, Midilli mathematical model

INTRODUCCIÓN

El secado de madera es un proceso fundamental en la industria forestal, especialmente en especies como el ciprés, que se utiliza en distintos ámbitos, desde la construcción hasta la fabricación de muebles y elementos decorativos (1). Sin embargo, el proceso de secado de madera, particularmente el de especies con características particulares como el ciprés, puede ser complejo debido a la variabilidad en sus propiedades físicas y la influencia de factores ambientales (2).

El comportamiento de la madera principalmente está condicionado por su contenido de humedad (3), motivo por el cual es importante reducir el contenido de agua antes de ser usada en la construcción, llevándolo a un nivel adecuado según las condiciones del lugar de uso (4). Factor

que es esencial para asegurar que el producto final sea estable y funcione correctamente. En general, las industrias de la madera reciben la materia prima en su estado húmedo, lo que requiere procesos de secado previos para su posterior uso (5). Un manejo adecuado de este proceso es crucial para evitar defectos en la madera, como grietas o deformaciones, que puedan comprometer la calidad del producto final (6).

En este contexto, el diseño de modelos predictivos en el secado de ciprés se presenta como una herramienta clave para optimizar el proceso (7), proporcionando predicciones más precisas sobre el comportamiento de la madera durante el secado, en función de variables como temperatura, humedad relativa, tiempo y grosor de las piezas (8). Estos modelos, desarrollados a partir de técnicas estadísticas y de aprendizaje automático, pueden ayudar a mejorar la eficiencia del secado de madera, reducir pérdidas económicas y minimizar el impacto ambiental al reducir el consumo energético (9).

El presente artículo se basa en la aplicación de modelos predictivos para el secado de ciprés, explorando sus fundamentos, metodologías y resultados obtenidos en estudios recientes. Se pretende resaltar la importancia de estos modelos en la mejora del proceso industrial y su potencial para innovar en el sector forestal, con una visión integral permitiendo así la mejora de la calidad final producto (10).

El proceso de secado de plantas está influenciado por factores como la temperatura, el método, la humedad ambiental y la velocidad de secado, que afectan la conservación de sus propiedades y apariencia (11). La calidad del secado de madera se relaciona a la eficacia en la reducción o eliminación de humedad, lo cual varía según el tipo de material y las necesidades específicas de humedad residual (12). Para controlar este proceso, es esencial monitorear la cinética de secado mediante modelos matemáticos que predicen el comportamiento de las plantas durante la deshidratación.

Esta investigación tiene como objetivo optimizar el proceso para el secado de la madera de ciprés (*Cupressus Sempervirens*) para su uso en la construcción, a través de la implementación de modelos predictivos que simulen el comportamiento de la madera durante el proceso de secado. Mediante estos modelos, se busca ajustar las condiciones de secado para mejorar la eficiencia del proceso, reducir defectos como grietas y deformaciones, y garantizar la estabilidad dimensional y la calidad del producto final. Además, se pretende aumentar la sostenibilidad al optimizar los parámetros de secado y reducir el consumo energético. Para este estudio se aplicó el modelo de Newton-Lewis y Midilli.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio utiliza un enfoque experimental para examinar la cinética del secado, enfocándose en el análisis detallado del comportamiento del *Cupressus Sempervirens* a lo largo del proceso de secado, considerando variables clave como la temperatura y el tiempo. En esta investigación para obtener datos más eficientes y exactos se empleó el modelamiento de secado

bajo las teorías que establece Newton- Lewis y Midilli, lo que permitió ajustar modelos matemáticos cinéticos y visualizar los resultados de manera más controlada y optimizada.

Secado en el laboratorio

Para el estudio, se utilizaron tablonces de madera de 10x10cm con un espesor de 2cm, los cuales fueron recolectados en el cantón Espejo, provincia de Carchi. El secado de la madera se realizó mediante un secador eléctrico. Para mantener la calidad composicional y la turgencia de la madera, la velocidad de secado se incrementó elevando la temperatura, siempre dentro de los límites que nos afecten el producto y su calidad final. Cabe resaltar que el aumento excesivo de la temperatura podría comprometer las propiedades físicas, químicas o biológicas de la madera. El secador utilizado fue capaz de mantener un flujo de aire con una temperatura controlada en un rango de 70 a 90 °C, y una velocidad de 0,1 a 3,0m/s ±0,05, medida mediante un anemómetro. Las muestras fueron pesadas mediante una balanza electrónica de alta precisión con una exactitud de 0,01g.

Determinación de la de humedad remanente

La proporción de humedad remanente se refiere a la cantidad de humedad que queda en el *Cupressus Sempervirens* después del proceso de secado o deshidratación. Esta proporción es esencial en diversas industrias, ya que la presencia de humedad residual puede afectar las propiedades del producto final. La determinación de la humedad remanente se expresa generalmente como un porcentaje del peso del material.

$$\text{Humedad Remanente (\%)} = (\text{Peso Inicial} - \text{Peso Seco}) \times 100$$

(1).

Peso Inicial: Es el peso en gramos del Cupressus Sempervirens antes del proceso de secado, Peso Seco: Es el peso en gramos del Cupressus Sempervirens después de completar el proceso de secado.

En la Figura 1 se ilustran los pasos seguidos para determinar la PHR. Los tablonces de madera de *Cupressus Sempervirens* fueron secados mediante aire caliente con una velocidad de 2 m/s, a temperaturas de 70, 80 y 90 °C. Durante el proceso, se realizaron pesajes tanto al inicio como al final, en determinados intervalos de tiempo, para monitorear la pérdida de humedad.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA DE CIPRÉS (*CUPRESSUS SEMPERVIRENS*) PARA SU APLICACIÓN EN CONSTRUCCIÓN MEDIANTE MODELOS PREDICTIVOS

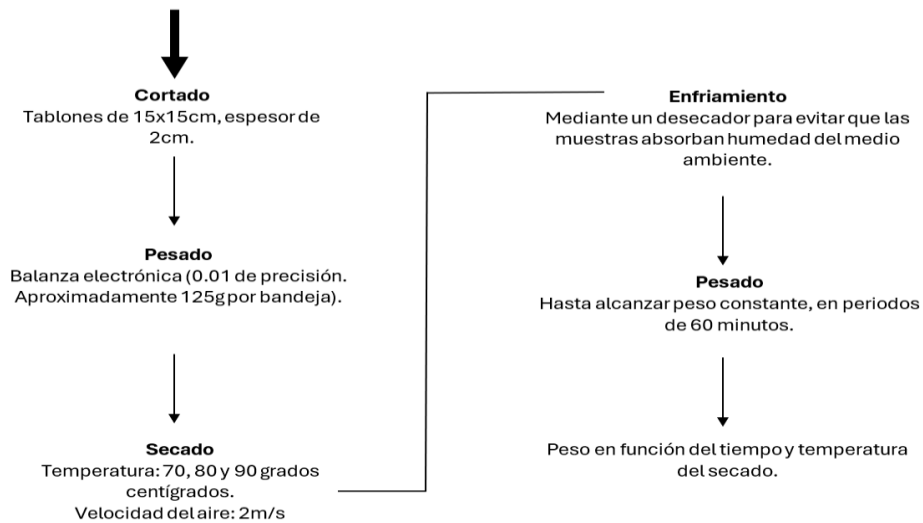


Figura 1. Secuencia de eventos ejecutados para obtener la proporción de humedad remanente.

La determinación de la humedad remanente es fundamental para asegurar que el *Cupressus Sempervirens* se encuentre dentro de los rangos aceptables para su uso específico. Un contenido de humedad excesivo puede ocasionar problemas como deterioro del producto, la pérdida de estabilidad y el crecimiento de microorganismos. Mientras que un secado excesivo podría resultar en la pérdida de propiedades esenciales del *Cupressus Sempervirens*.

Para obtener mediciones precisas de la humedad remanente, se emplean técnicas modernas como los analizadores de humedad, que proporcionan resultados más rápidos y exactos en relación con métodos tradicionales, como por ejemplo el secado en estufa y el pesaje continuo. El crucial ajustar el proceso de secado de madera en función de las necesidades del material y su aplicación final, con la finalidad de garantizar que se alcance la humedad remanente óptica.

Velocidad de secado

La velocidad de secado hace referencia a la rapidez con la que se elimina la humedad del *Cupressus Sempervirens* durante el proceso de secado o deshidratación. Este parámetro es crucial en diversas industrias, debido a que directamente influye en la eficiencia del proceso, además puede afectar la calidad final del producto. Factores como el tipo de *Cupressus Sempervirens*, temperatura, humedad relativa, espesor del material, flujo de aire y propiedades del agua generan un papel importante para determinar la velocidad de secado. Es fundamental gestionar este proceso con cuidado para evitar problemas como la formación de grietas, pérdida de propiedades del material o la variabilidad en la calidad. Lograr un equilibrio adecuado entre la velocidad de secado y la conservación de las características del material es clave para obtener resultados satisfactorios.

La velocidad o rapidez del secado puede determinarse aplicando la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad de Secado} \left[\frac{\text{gramos de agua}}{\text{unidad de tiempo}} \right] = \frac{dh(t)}{dt} \approx \frac{h(t + \Delta t) - h(t)}{\Delta t} \quad (2)$$

dh: proporción remanente de agua; *t*: tiempo; *k*: constante; *h*: humedad

Modelado del secado

El modelado del proceso de secado consiste en desarrollar ecuaciones matemáticas que describen como la humedad de un material disminuye a medida que transcurre el tiempo durante el secado. Estos modelos son herramientas esenciales para comprender y optimizar dicho proceso. Es fundamental validar los modelos con datos experimentales para garantizar su precisión y aplicabilidad. Los parámetros del modelo se ajustan con base obtenidos durante el secado real del material. La selección del modelo adecuado corresponde a las características del material y de las condiciones específicas del proceso de secado o deshidratación. Es común utilizar modelos combinados o adaptados para abordar las particularidades tanto del material como del sistema de secado. Así, los modelos se convierten en herramientas clave para la optimización y diseño de procesos de secado en diferentes sectores industriales.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de modelos matemáticos ajustados a datos experimentales del porcentaje de humedad restante en el secado de maderas. En esta investigación, se empleó el modelo de Newton, derivado teóricamente bajo ciertas suposiciones que simplifican las soluciones de la segunda Ley de Fick. Este modelo asume que existen una relación directa entre el contenido promedio de agua y el tiempo de secado.

RESULTADOS

La determinación de la proporción de humedad remanente en relación con el tiempo fue realizada experimentalmente bajo tres condiciones de temperatura de secado: 70 °C, 80 °C y 90 °C. Para realizar este análisis, se pesaron las muestras de *Cupressus sempervirens* antes de iniciar el proceso de secado, con el fin de obtener un peso inicial de referencia. Posteriormente, se procedió a secar las muestras en las mencionadas temperaturas, realizando mediciones periódicas del peso hasta que este alcanzó un valor constante, lo que indica que el proceso de evaporación de la humedad había finalizado de manera efectiva.

El proceso de secado se consideró concluido cuando el peso de las muestras se estabilizó y no mostró cambios significativos en varias mediciones sucesivas. Este comportamiento de estabilidad del peso sugiere que la cantidad de humedad remanente en las muestras había llegado a un equilibrio con las condiciones ambientales de secado (13). Los datos obtenidos durante estos ensayos han sido utilizados para el modelado del proceso de secado, permitiendo el análisis de la relación entre el tiempo de secado y las diferentes temperaturas aplicadas.

La tabla 1 presenta los registros experimentales de los valores de la PHR (Porcentaje de Humedad Remanente) durante el proceso de secado de una muestra a una temperatura constante de 70 °C. A lo largo de 20 horas de secado, se observa cómo el peso de la humedad disminuye progresivamente, lo que provoca una reducción en el porcentaje de humedad remanente. Al

inicio (0 horas), el material tiene una humedad del 100%, y después de 20 horas de secado, la humedad remanente es del 21,99%. Esto indica que el proceso de secado es eficaz, eliminando gradualmente la humedad del material

Tabla 1. Registros experimentales de los valores de la PHR durante el secado a temperaturas de 70 °C.

Temperatura (°c)	Tiempo (horas)	Peso de la humedad (gramos)	Humedad (gramos)	Humedad (%) phr
70	0	500,73	0,00	100,00
	1	459,12	41,61	91,69
	2	407,73	93,00	81,43
	3	383,39	117,34	76,57
	4	359,62	141,11	71,82
	5	325,17	175,56	64,94
	6	309,25	191,48	61,76
	7	293,64	207,09	58,64
	8	258,19	242,54	51,56
	9	233,79	266,95	46,69
	10	217,56	283,17	43,45
	11	196,57	304,16	39,26
	12	171,80	328,93	34,31
	13	150,52	350,21	30,06
	14	133,33	367,40	26,63
	15	125,43	375,30	25,05
	16	118,77	381,96	23,72
	17	115,54	385,19	23,07
	18	110,43	390,31	22,05
	19	110,21	390,52	22,01
20	110,12	390,62	21,99	

La Tabla 2 presenta los registros experimentales de los valores de la Pérdida de Humedad Relativa (PHR) durante el secado de ciprés a 80 °C. Los datos incluyen el tiempo de secado en horas, el peso total del material, el peso de la humedad, la cantidad de humedad en gramos y el porcentaje de humedad restante. A lo largo del proceso de secado, el porcentaje de humedad disminuye progresivamente, comenzando en un 100% al inicio del secado (0 horas) y bajando gradualmente hasta estabilizarse alrededor del 21.9% al final del proceso (18 horas). Este comportamiento refleja la reducción de la humedad en el material conforme avanza el tiempo de exposición a la temperatura de 80 °C.

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE SECADO DE MADERA DE CIPRÉS (*CUPRESSUS SEMPERVIRENS*) PARA SU APLICACIÓN EN CONSTRUCCIÓN MEDIANTE MODELOS PREDICTIVOS

Tabla 2. Registros experimentales de los valores de la PHR durante el secado a temperaturas de 80 °C.

Temperatura (°c)	Tiempo (horas)	Peso de la humedad (gramos)	Humedad (gramos)	Humedad (%) phr
80	0	500,90	0,00	100,00
	1	451,87	49,03	90,21
	2	401,16	99,75	80,09
	3	383,39	117,51	76,54
	4	342,80	158,11	68,44
	5	322,23	178,67	64,33
	6	295,99	204,91	59,09
	7	276,32	224,58	55,16
	8	232,59	268,32	46,43
	9	216,14	284,77	43,15
	10	190,97	309,93	38,13
	11	160,27	340,64	32,00
	12	146,18	354,72	29,18
	13	129,68	371,23	25,89
	14	116,80	384,10	23,32
	15	113,23	387,68	22,60
	16	109,85	391,06	21,93
	17	110,03	390,87	21,97
18	109,73	391,18	21,91	

La Tabla 3 muestra los registros del Porcentaje de Humedad Remanente (PHR) durante el secado de un material a 90°C. En la tabla se presentan valores de tiempo, peso de la humedad, humedad (en gramos) y el porcentaje de humedad (%). Al inicio del experimento, cuando el tiempo es 0 horas, la humedad es del 100%. A medida que transcurre el tiempo de secado (de 1 a 16 horas), el peso de la humedad disminuye y, consecuentemente, la humedad (%) también se reduce al 21,32% al final del proceso de secado. Este comportamiento refleja la reducción progresiva de la humedad en el material a medida que aumenta el tiempo de exposición a la temperatura de 90°C.

Tabla 3. Registros experimentales de los valores de la PHR durante el secado a temperaturas de 90 °C.

Temperatura (°c)	Tiempo (horas)	Peso de la humedad (gramos)	Humedad (gramos)	Humedad (%) phr
90	0	501,09	0,00	100,00
	1	343,89	157,20	68,63
	2	411,88	89,21	82,20
	3	370,47	130,62	73,93
	4	345,45	155,64	68,94
	5	312,89	188,20	62,44
	6	287,21	213,88	57,32
	7	248,87	252,22	49,67
	8	210,31	290,78	41,97
	9	179,42	321,67	35,81
	10	161,66	339,43	32,26
	11	133,12	367,97	26,57
	12	121,94	379,15	24,34
	13	113,41	387,68	22,63
	14	111,29	389,80	22,21
	15	110,42	390,67	22,04
16	106,83	394,26	21,32	

Modelamiento de Secado: A continuación, se muestran los distintos modelamientos de secado.

Modelamiento de secado Newton- Lewis

El proceso de modelamiento del secado consistió en la formulación de ecuaciones matemáticas que describen cómo varía la humedad contenida en un material a lo largo del tiempo durante el proceso de secado. Esta tarea se realizó mediante el modelo matemático de Newton- Lewis, el cual es ampliamente estudiado por su capacidad para representar la cinética de secado en materiales porosos. Este modelo asume que la tasa de pérdida de humedad está directamente relacionada con la diferencia de concentración de la humedad entre la superficie del material de estudio y su interior, lo que permite describir el traspaso de masa durante el proceso de secado de manera precisa (14).

El modelo de Newton- Lewis considera los cambios en la humedad en función del tiempo y de las condiciones del proceso de secado, tales como la velocidad del aire circundante y la temperatura (15). Para validar y ajustar el modelo, se emplearon los datos analizados obtenidos durante el proceso de secado realizados a diferentes temperaturas, como se mencionó previamente. La aplicación del modelo permitió predecir la evolución de la humedad a lo largo del tiempo, facilitando la comprensión del comportamiento del material durante el secado bajo distintas condiciones térmicas. Los resultados que se obtuvieron del modelado se evidencian en la Tabla 4, donde se detallan las ecuaciones formuladas y los parámetros utilizados para describir el proceso de secado.

Tabla 4. Modelamiento de secado Newton- Lewis

MODELO	TEMPERATURA	K	N	R2	RMS
Newton- Lewis	70	0,08624		0,99338	1,98896
	80	0,09403		0,99202	2,21626
	90	0,07973		0,94972	5,39847

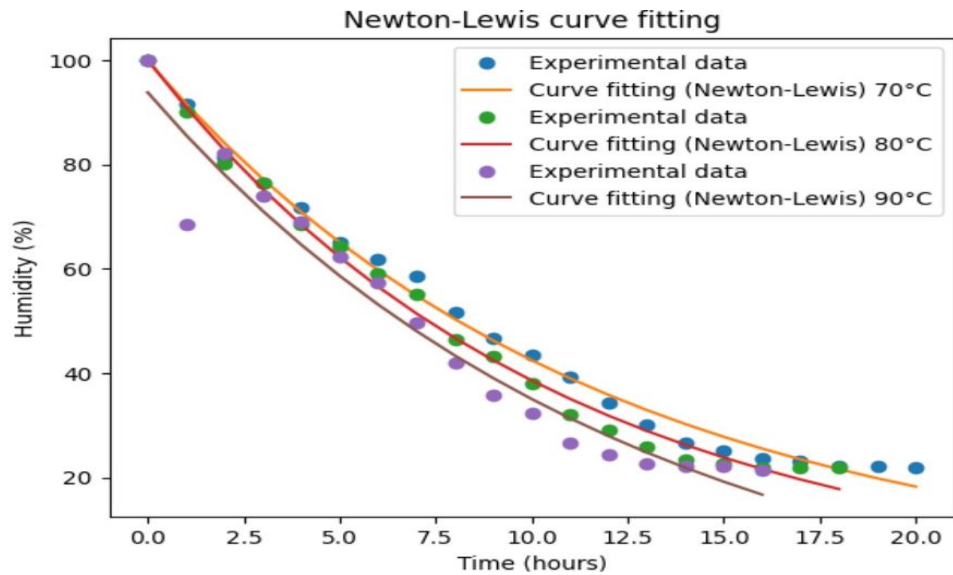


Figura 2. Modelamiento de secado Newton- Lewis

Temperaturas de secado 70, 80 y 90° C

Modelamiento de secado Midilli

El proceso de modelado del secado consistió en desarrollar un conjunto de ecuaciones matemáticas que describen cómo cambia la humedad de un material a lo largo del tiempo durante su secado bajo condiciones específicas. Para ello, se empleó el modelo matemático de Midilli, que hace referencia a la idea de que la velocidad de pérdida de humedad depende directamente de la diferencia de la concentración de humedad entre la superficie del material y el interior del material, lo cual favorece la transferencia de masa desde el interior hacia la superficie y facilita la evaporación del agua (16). Una de las ventanas principales del modelo de Midilli es la capacidad de considerar tanto los cambios en la humedad del material a lo largo del tiempo como las condiciones externas, tales como la velocidad del aire y la temperatura, que influyen en el proceso de secado (17). Estos factores son determinantes para una representación precisa del fenómeno, ya que la temperatura afecta la tasa de evaporación y la circulación del aire incide en la rapidez con la que la humedad es eliminada de la superficie.

Para validar y ajustar el modelo a las condiciones experimentales específicas, se utilizaron datos obtenidos en ensayos de secado realizados a distintas temperaturas y con diferentes flujos de aire. Estos datos, que incluyeron mediciones de la humedad residual del material en diversos momentos, fueron esenciales para calibrar el modelo y garantizar su fiabilidad. A partir de esta

información, se pudieron determinar los parámetros que mejor describen el comportamiento del material durante el proceso de secado.

Gracias a la aplicación del modelo de Midilli, fue posible predecir con mayor precisión la variación de la humedad con el tiempo, lo que facilitó una mejor comprensión del comportamiento del material bajo distintas condiciones térmicas y de secado. Este enfoque no solo ofrece información valiosa sobre la eficiencia del proceso, sino que también contribuye a optimizar las condiciones operativas para lograr un secado más eficiente y controlado. Los resultados obtenidos mediante el modelado se presentan en la Tabla 5, en la que se detallan las ecuaciones formuladas y los parámetros utilizados en las simulaciones del proceso de secado. Estos resultados proporcionan una visión más clara de las interacciones entre las variables clave involucradas y sirven como base para futuras investigaciones y aplicaciones industriales en el ámbito del secado de materiales.

Tabla 3. Modelamiento de secado Midilli

Modelo	Temperatura	K	N	R2	RMS
Midilli	70	0,07349	1,12418	0,99385	1,91598
	80	0,07466	1,18665	0,99304	2,07079
	90	0,02952	1,70663	0,95228	5,25907

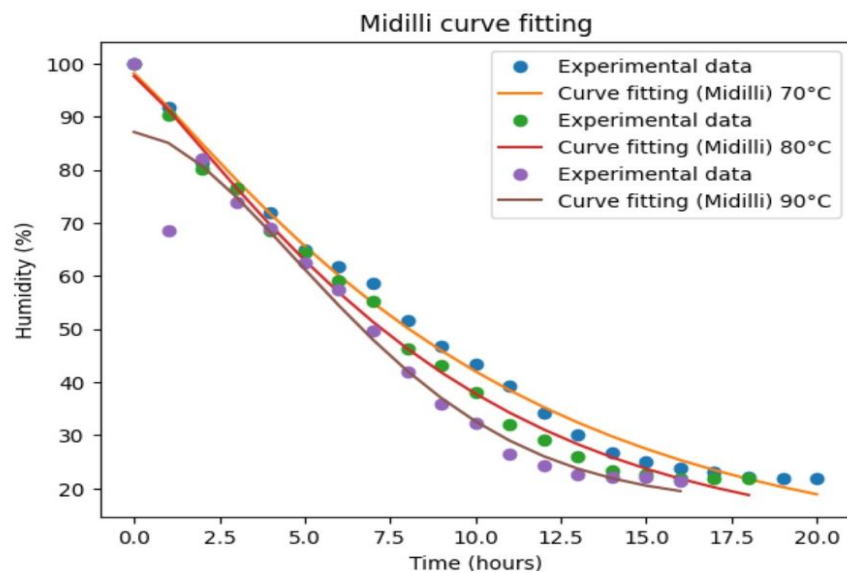


Figura 3. Modelamiento de secado Midilli

Temperaturas de secado 70, 80 y 90° C

DISCUSIÓN

La presente investigación presenta un estudio sobre el proceso de secado de muestras de *Cupressus sempervirens* a distintas temperaturas (70 °C, 80 °C y 90 °C) para determinar la proporción de humedad remanente en relación con el tiempo. El análisis experimental muestra

cómo la humedad disminuye a medida que el tiempo de secado avanza, alcanzando una estabilización que indica la finalización del proceso. Los resultados obtenidos de las mediciones de peso a lo largo del tiempo fueron utilizados para modelar el proceso de secado a través de dos enfoques matemáticos: el modelo de Newton-Lewis y el modelo de Midilli. Ambos modelos permiten comprender la cinética de secado bajo distintas condiciones térmicas, facilitando la predicción de la evolución de la humedad durante el proceso (18).

Uno de los aspectos más relevantes del estudio es la comparación entre los dos modelos de secado. El modelo de Newton-Lewis, conocido por su simplicidad y eficacia en materiales porosos, mostró buenos resultados al predecir la pérdida de humedad en función del tiempo, con un alto valor de R^2 (19). Este modelo, sin embargo, tiene limitaciones al no considerar ciertos factores complejos, como los cambios en las propiedades internas del material durante el secado (20). En contraste, el modelo de Midilli, que integra más variables como la velocidad del aire y la temperatura, ofrece una representación más detallada del proceso de secado (21). No obstante, el ajuste de este modelo fue algo menos preciso, especialmente a temperaturas más altas, lo que sugiere que su capacidad predictiva puede verse afectada en condiciones extremas.

A través de la comparación de los datos experimentales con las predicciones de ambos modelos, se observa que la temperatura juega un papel crucial en la velocidad de secado. A medida que la temperatura aumenta, el proceso de evaporación de la humedad se acelera, reduciendo el tiempo necesario para alcanzar la humedad residual deseada (22). Sin embargo, este aumento de temperatura también podría generar riesgos de deterioro del material, un factor que debe ser considerado al implementar estos modelos en aplicaciones industriales (23). Así, el estudio subraya la importancia de optimizar las condiciones de secado para mejorar la eficiencia sin comprometer la calidad del material.

Este tipo de investigaciones resulta fundamental para la industria del secado de materiales, ya que permite predecir y controlar el proceso de manera más eficiente (24). Si bien los modelos utilizados muestran un buen ajuste en la mayoría de los casos, es necesario seguir investigando para mejorar su precisión y aplicabilidad, especialmente bajo condiciones operativas variables o con materiales de características diferentes (25). El trabajo demuestra cómo la combinación de experimentación y modelado matemático puede ofrecer soluciones valiosas para optimizar procesos industriales.

CONCLUSIONES

Este estudio analizó el comportamiento de la madera de *Cupressus sempervirens* durante su secado por convección con aire caliente, un proceso crucial para preparar materiales utilizados en la construcción. Se evaluaron tres temperaturas de secado (70, 80 y 90 °C) con una velocidad constante de circulación de aire de 2 m/s. Los resultados obtenidos utilizando los modelos matemáticos de Newton-Lewis y Midilli para determinar el Porcentaje de Humedad Remanente (PHR) mostraron una excelente concordancia con los datos experimentales, lo que valida la aplicabilidad de estos modelos para describir el proceso de secado de esta madera.

La aplicación de estos modelos ha permitido establecer una relación matemática precisa entre el PHR, el tiempo de secado y la temperatura, lo cual es de gran utilidad para la industria de la construcción. Estos modelos facilitan la predicción de cómo la humedad evoluciona bajo distintas condiciones operativas, lo que optimiza los procesos industriales de secado de maderas. Esto resulta fundamental para mejorar la calidad de la madera y garantizar su adecuación para su uso en la construcción.

Además, los resultados obtenidos permiten establecer condiciones de secado controladas que aseguran la conservación de las propiedades mecánicas y estéticas de la madera. Un secado adecuado es esencial para preservar las características estructurales y la durabilidad de la madera, impactando directamente en la seguridad y longevidad de las edificaciones. En conjunto, el uso de modelos matemáticos como Newton-Lewis y Midilli contribuye a un proceso de secado eficiente y controlado, mejorando la calidad de los materiales para la industria maderera y la construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants*. Academic Press.
2. Moya, R., & Lema, P. (2017). *Maderas y su Aplicación en la Construcción: Propiedades y Procesamiento*. Editorial Universitaria
3. Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of Woody Plants*. Academic Press.
4. Carter, P. A. (2005). *Drying of Lumber: A Practical Guide for Forest Products Professionals*. Forest Products Society.
5. Foglia, R. C. (2005). Conceptos básicos sobre el secado de la madera. *Revista Forestal Mesoamericana* Kurú, 2(5), 88-92.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5123396>
6. Iglesias, G. (2009). *Tecnología de la Madera y sus Aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa.
7. Zhang, S. Y., & Zhang, W. (2010). *Wood Properties and Their Implications for Wood Processing*. *Wood Science and Technology*, 44(6), 601-612.
8. Cohen, D., & Diaz, M. (2011). *Tecnología de Secado de Madera: Métodos y Defectos*. Ediciones Técnicas Forestales.
9. Kumar, P., & Murugan, S. (2017). *Application of Machine Learning Techniques in Wood Drying Process Optimization*. *Journal of Wood Science*, 63(6), 532-543.
10. Jia, Y., & Sun, Y. (2017). *Predictive Models in Wood Drying Process Optimization*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115, 708-717.
11. Hassan, M. M., & Shama, L. M. (2021). *The role of environmental conditions in the preservation of plant quality during drying*. *International Journal of Food Science*, 56(7), 3451-3460.
12. Yang, W., & Zhang, H. (2017). *Modeling and optimization of drying processes for food products: The effect of moisture content on drying efficiency*. *Food Bioprocess Technology*, 10(4), 586-596.

13. Chauhan, S., & Sah, S. (2015). "Wood Drying and its Effect on Wood Properties". *International Journal of Forestry Research*, 2015, 1-11.
14. Díaz, M. S., & González, M. F. (2011). "Tecnología de Secado de Madera: Métodos y Defectos". Ediciones Técnicas Forestales.
15. McDonald, D. R. (2010). "Wood and Wood Products: Measurement and Testing Methods". *Wood Science and Technology*.
16. Cai, L., & Zhang, Z. (2012). "Moisture Content Determination in Wood". *Forest Products Journal*, 62(4), 292-299.
17. Torelli, N., & Gallo, M. (2016). "Moisture Measurement and Control in Wood Processing". *Wood Science and Technology*, 50(1), 47-60.
18. Gordón, A., & Prieto, J. (2016). *Control del proceso de secado de madera y sus efectos sobre la calidad del producto*. *Revista de Tecnología de Maderas*, 23(4), 321-335.
19. García, M., & Martínez, L. (2018). *Estudio de la cinética de secado en maderas tropicales y su relación con las propiedades finales*. *Forests*, 9(7), 398-410.
20. Kucuk, A., & Dincer, I. (2010). *Mathematical modeling of the drying process of wood: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2421-2433.
21. Alavi, S. M., & Smith, R. S. (2009). *Modeling of drying process for various materials: A review*. *Drying Technology*, 27(7), 822-832.
22. Liu, Z., & Zhou, G. (2017). *Mathematical models for drying kinetics of agricultural products*. *Food Engineering Reviews*, 9(2), 70-85.
23. Papadakis, V. (2004). *Mathematical modeling of drying and transport of moisture in wood and other porous materials*. *Drying Technology*, 22(6), 1525-1539.
24. Jang, S., & Lee, S. (2007). *Mathematical modeling of drying behavior of wood and its application to the drying of wood products*. *Wood Science and Technology*, 41(1), 33-46.
25. Hernández, L. F., & Torres, A. P. (2010). *Modelos de secado y su aplicación en materiales porosos: Un enfoque basado en la ley de Fick y el modelo de Newton*. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 9(3), 137-145.