



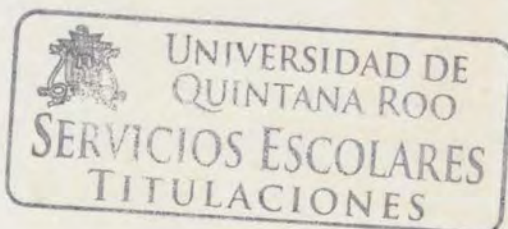
**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**"Secado de madera de pino a baja temperatura"**

**TRABAJO MONOGRÁFICO**  
Para obtener el grado de  
**Ingeniero en sistemas de energía**

**PRESENTA**  
**Marcial Sánchez Pool**

**SUPERVISORES**  
**Dr. José Hernández Rodríguez**  
**Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**  
**Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool**



Chetumal Quintana Roo, México, noviembre de 2016




**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

Trabajo Monográfico elaborado bajo la supervisión del Comité de asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

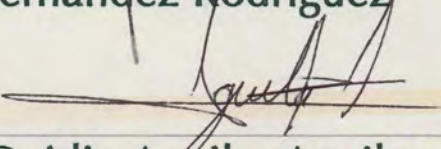
**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**Comité de supervisión:**

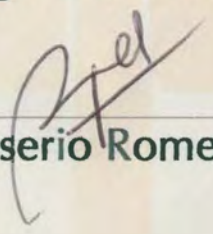
Asesor:

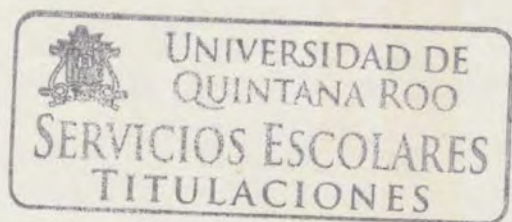
  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Hernández Rodríguez

Asesor:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Asesor:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool



Chetumal Quintana Roo, México, noviembre de 2016



***Dedicado a:***

***A Dios.***

*Por haberme permitido culminar este logro en mi vida.*



## **Agradecimientos:**

### ***A mis padres Marcial y Esther.***

*Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.*

### ***A mi esposa Liliana.***

*Por los ejemplos de paciencia y constancia que la caracterizan y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor incondicional en los momentos más difíciles.*

### ***A mi hija Adriana.***

*La motivación de mi vida y la alegría de mis días, gracias por estar a mi lado con tus ocurrencias y frases tan memorables.*

### ***A mis hermanas y hermano.***

*Por su cariño y amor que siempre tengo de ellos, por su apoyo y guía. Nidia, Ana, Pedro y Gianni, siempre les agradeceré su tiempo que vivimos y aprendimos unos de otros, gracias por la hermosa infancia que tuvimos juntos.*

### ***A mis maestros.***

*Al Dr. José Hernández por su infinita paciencia y motivación para culminar la elaboración de esta monografía, al Dr. Ovidio por su apoyo ofrecido en este trabajo, al Dr. Romeli por su tiempo y consejos. A los tantos maestros que tuve en la carrera de ingeniería, que impulsaron mi desarrollo personal y profesional.*

### ***A mis amigos.***

*A mis compañeros de generación y amigos del alma, Francisco, Miguel Ángel, Lizbet, Lidieth, Christian (q.e.p.d.), Carolina, Ricardo, Bernardirno, Zamudio, gracias por su amistad.*

***Marcial Sánchez Pool***



## CONTENIDO

<b>Contenido</b>	III
<b>Resumen</b>	VI
<b>Objetivos</b>	VII
<b>Descripción capitular</b>	VIII
<b>Capítulo 1: Características y propiedades de la madera.</b>	1
1.1 Introducción	1
1.2 Clasificación de la madera	1
1.3 Componentes principales de la madera	2
1.3.1 Celulosa	3
1.3.2 Hemicelulosa	3
1.3.3 Lignina	4
1.3.4 Extractivos	5
1.4 Estructura de la madera	5
1.4.1 Anillos de crecimiento	8
1.4.2 Madera temprana y tardía	9
1.4.3 Rayos de madera	10
1.4.4 Conductos de resina	10
1.4.5 Poros	11
1.5 Estructura anatómica de madera	12
1.6 Conductividad térmica de la madera	16
1.7 Gravedad específica y peso de madera	17
1.8 Relaciones entre el agua y la madera.	19
1.8.1 Contenido de humedad de la madera.	20
1.8.2 Punto de saturación de fibra.	20
1.8.3 Contenido de humedad de equilibrio	21
1.8.4 Contenido de humedad de madera en servicio.	22





<b>Capítulo 2: Proceso de secado de la madera.</b>	26
2.1 Principios del secado	26
2.2 Factores físicos que afectan el secado de la madera	27
2.3 Secado de madera: los mecanismos de movimiento de humedad	28
2.3.1 Conductos de humedad	28
2.3.2. Espacio del movimiento de humedad	29
2.4 Fuerzas impulsoras para el movimiento de humedad.	30
2.5 Direcciones del movimiento de humedad por difusión.	31
2.6 Motivos de hendiduras y grietas durante el secado y su control.	32
2.7 Condiciones higrotérmicas del aire.	32
2.8 Velocidad del aire.	34
2.9 Etapas de secado	35
2.10 Consideraciones adicionales sobre las etapas de secado.	37
2.11 Estado del arte de la investigación en secado de madera.	38
2.11.1 Modelo bidimensional ortotrópico.	38
2.11.2 Modelo bidimensional: flujo del aire en un arreglo de madera dentro de un horno de secado.	40
2.11.3 Modelo unidimensional: Técnica de homogenización, para determinar el elemento de volumen representativo, (EVR)	41
<b>Capítulo 3: Pruebas de secado.</b>	46
3.1 Desarrollo experimental.	46
3.2 Comparativo 1	48
3.2.1 Resultados del comparativo 1	50
3.3 Comparativo 2	52
3.3.1 Resultados del comparativo 2	53
3.4 Comparativo 3	55
3.4.1 Resultados del comparativo 3	56
3.5 Comparativo 4	57
3.5.1 Resultados del comparativo 4.	58



3.6 Compendio de resultados	60
<b>Capítulo 4: Conclusiones</b>	63
<b>Literatura citada</b>	65
<b>Índice de tablas y figuras</b>	68
<b>Anexos</b>	71



# SECADO DE LA MADERA DE PINO A BAJA TEMPERATURA

## Resumen

El proceso de secado es uno de los métodos más antiguos empleados por el hombre para la conserva y mejoramiento de las propiedades mecánicas de la madera, sin embargo, es uno de los pasos que consume más tiempo y energía en el procesamiento final de la madera

El presente trabajo es una recopilación de la experiencia obtenida en la Universidad de Quintana Roo durante el año 2006 en el cual se estuvo colaborando en un proyecto de la División de Ciencias e Ingeniería (DCI), sobre procesos de secado. Este trabajo consistió en la realización de pruebas experimentales de secado de la madera de pino, dentro de un túnel construido exprofeso, y en donde se llevaron a cabo pruebas bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad de flujo del medio secante, analizando la influencia de dichos parámetros en la pérdida de humedad de las muestras de madera.

Los resultados obtenidos son satisfactorios, la variación del contenido respecto a la temperatura y la velocidad de flujo secante se comportó acorde a las teorías establecidas del proceso de secado. Se espera que estos resultados a bajas temperaturas sirvan a trabajos posteriores como parámetro comparativo.





## OBJETIVOS

**Objetivo General:** Estudiar el efecto de las variables temperatura y velocidad del medio secante en el proceso de secado de la madera de pino.

**Objetivos específicos:**

- Realizar pruebas de secado de la madera de pino a bajas temperatura (entre 45 y 60 °C) para analizar el efecto en la perdida de humedad
- Analizar el efecto de la dirección del flujo del medio secante con respecto a la dirección de las fibras de la madera de pino, en su efecto en la perdida de humedad de la madera.

**Supervisores:**

- Dr José Hernández Rodríguez
- Dr Jorge Ovidio Aguilar Aguilar
- Dr Gliserio Romeli Barbosa Pool



## DESCRIPCIÓN CAPITULAR

Para realizar el presente trabajo monográfico, se ha dividido en 4 capítulos ordenados de la siguiente forma:

**Capítulo 1:** Se describen las características y las propiedades de la madera, como también conceptos base para la teoría de secado.

**Capítulo 2:** Menciona los procesos internos y externos que ocurren durante el proceso de secado de la madera, la descripción de cada etapa de este proceso, así como las teorías y modelos matemáticos más relevantes.

**Capítulo 3:** Se describen los comparativos y gráficas del contenido de humedad, obtenidas de las pruebas experimentales realizadas, a diferente orientación de las fibras respecto al flujo de aire, así como sus réplicas a distinta temperatura y velocidad de flujo.

**Capítulo 4:** Se comenta los hechos más sobresalientes observados durante la realización de este proyecto de investigación, así como las observaciones basadas en las gráficas de los resultados experimentales.



# CAPÍTULO I

## CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LA MADERA

### **1.1 Introducción**

El secado de la madera es uno de los pasos que consume más tiempo y energía en el procesamiento de la madera [1]. La estructura anatómica de la madera limita la rapidez con que el agua puede moverse en la superficie y dentro de la madera, aunado a esto tenemos la variabilidad de las propiedades de la madera dentro de la misma especie, árbol o segmento de madera que complica entender el proceso de secado. Las propiedades de muestras aparentemente idénticas son raramente las mismas. Las interacciones entre la madera, agua, calor, y tensión durante el secado son complejas. El objetivo de este capítulo es describir algunas propiedades fundamentales de la madera que son relevantes en el proceso de secado. Hablaremos de su clasificación, su estructura, el movimiento del agua en la madera, gravedad específica, las propiedades térmicas de la madera, así como algunos de los modelos matemáticos que describen el proceso de secado.

### **1.2 Clasificación de la madera**

La madera es un medio poroso formado de un gran número de muy pequeños elementos o células. La madera no es un material sólido y homogéneo en sus propiedades, por lo que se le cataloga como una sustancia anisotrópica. Las maderas comerciales se clasifican en dos categorías, maderas blandas y maderas duras. Esta clasificación no está basada en las propiedades mecánicas de blandura o dureza, mejor dicho, refleja orígenes botánicos diferentes. Los orígenes de las descripciones "madera blanda" "y madera dura" posiblemente se derivan de descripciones comerciales provenientes del noroeste de Europa. Las maderas blandas son derivadas del grupo de planta de las gimnospermas, comúnmente llamado las



coníferas o las plantas que soportan cono, que se caracterizan por sus hojas en forma de aguja y semillas desnudas [2]. Algunos ejemplos de coníferas son pinos (*Pinus* spp.), las piceas (*Picea* spp.) y los abetos (*Abies* spp.). Las maderas duras pertenecen al grupo de plantas llamadas angiospermas, que a su vez se divide en dos subgrupos llamados monocotiledones y dicotiledóneas, generalmente conocidas como árboles de hoja ancha. Ejemplos de tales árboles son los eucaliptos (*Eucalipto* spp.), roble (*Quercus* spp.) y la haya del sur (*Nothofagus* spp).

Bajo la Unión Internacional del sistema de nombramiento de la Nomenclatura Biológica, cada árbol tiene un nombre con dos partes; un género y una especie, a menudo llamada el nombre científico. Las maderas pueden ser conocidas comúnmente por más de dos nombres, uno es el nombre vernáculo (o nombre local) y otro es el nombre comercial (nombres aceptados y establecidos en industrias de madera internacionales). Por ejemplo, *Pinus sylvestris* es el nombre científico de la Secoya (nombre comercial), en la localidad conocido como el pino de escoceses.

Las maderas blandas son relativamente simples en su estructura, aproximadamente el 90 % de su volumen está formado de una clase de células puntiagudas axialmente alargadas de 2 a 5 mm en la longitud llamadas traqueidas [3]. Las maderas blandas son generalmente maderas de media a bajas densidades en el rango de 350 a 700 kg/m<sup>3</sup> (densidad básica en contenido de humedad del 12 %) [2].

### **1.3 Componentes principales de la madera**

La madera contiene tres componentes principales: la celulosa que proporciona la mayor parte de la fuerza mecánica, la hemicelulosa que es la matriz, y la lignina que sirve para unir a las células. Además de éstos, el duramen en particular, contiene extractivos (componentes orgánicos) que son de bajo peso molecular que pueden aumentar la pared celular y reducir la higroscopicidad y permeabilidad [4]. Estos pueden estar en los lúmenes así como en la pared celular. Las proporciones aproximadas de estos componentes son dadas en la tabla 1.1

**Tabla 1.1.** Composición de la estructura celular de la madera. [1]

<b>Composición de la estructura celular de la madera</b>		
<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje del peso en base seca de los componentes de la estructura celular de la madera</b>	
	<b>Maderas blandas</b>	<b>Maderas duras</b>
Celulosa	40-50	40-50
Hemicelulosa	20-30	25-40
Lignina	25-35	20-25
Extractivos	0-25	0-25

### **1.3.1 Celulosa**

La celulosa es el principal componente estructural de la madera. Constituye aproximadamente el 50 % tanto de maderas blandas como de maderas duras, de allí su participación en la fortificación de la estructura de la pared celular [5]. La celulosa ( $C_6H_{10}O_5$ ) es un largo polímero de cadena directa con un grado medio de polimerización, de al menos 9000-10 000 unidades de glucosa [6]. Cada unidad de glucosa contiene tres grupos hidroxilos que pueden formar uniones de hidrógeno con el agua en regiones amorfas, forzando cadenas adyacentes que pueden causar el aumentando de la pared celular.

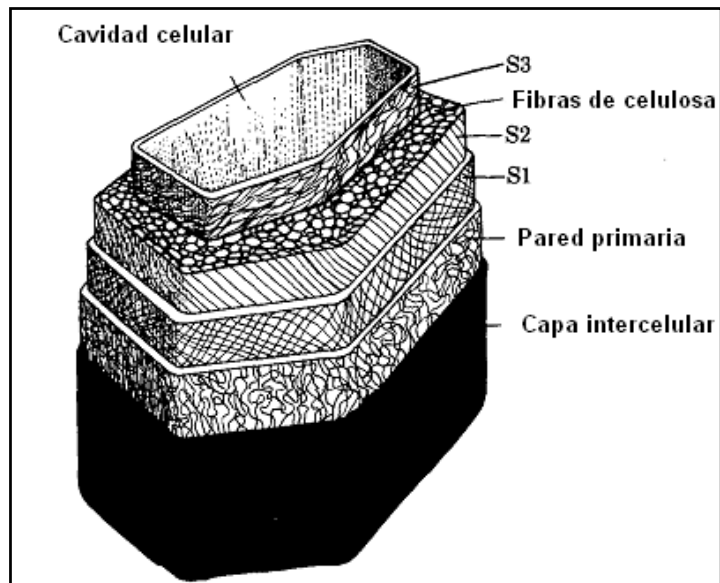
### **1.3.2 Hemicelulosa**

La hemicelulosa está en asociación cercana con la celulosa en la pared celular y en la constitución de la fibrosis. La hemicelulosa es una mezclas de polisacáridos, sintetizados casi completamente de 5 azúcares neutros diferentes: las glucosas *hexosa*, *manosa* y *galactosa*. y las pentosas *xilosa* y *arabinosa* [5], [6]. La hemicelulosa tiene una estructura más débil y más diferenciada que la celulosa cristalina. Las cadenas moleculares son mucho más cortas comparadas con la celulosa. Las maderas duras contienen más hemicelulosa que las maderas blandas, y la composición de azúcar es diferente [5].

### 1.3.3 Lignina

El tercer componente principal de la madera es la lignina, ésta es una macromolécula amorfa compleja. Durante el desarrollo de célula, la lignina es el último componente incorporado a la pared celular, interpenetrando la fibrosis y reforzando la pared celular. La lignina está principalmente localizada entre la capa media intercelular y en la pared celular secundaria S2, como se observa en la figura 1.1.

Las maderas blandas contienen más lignina que la maderas duras, también hay diferencias estructurales entre la lignina de la madera blanda y de la madera dura. [5]. Si miramos una traqueida bajo un microscopio de alta potencia, la pared aparece como una serie de capas. La capa intercelular, que está entre las células y que sirve para mantenerlos unidos, consiste en gran parte de lignina. Aunque la lignina se encuentra en todas partes de la pared celular, se concentra principalmente en el exterior de la pared celular.



**Figura 1.1.** Sección transversal de una célula de madera con sus respectivas capas que componen la pared celular [5]



### **1.3.4 Extractivos**

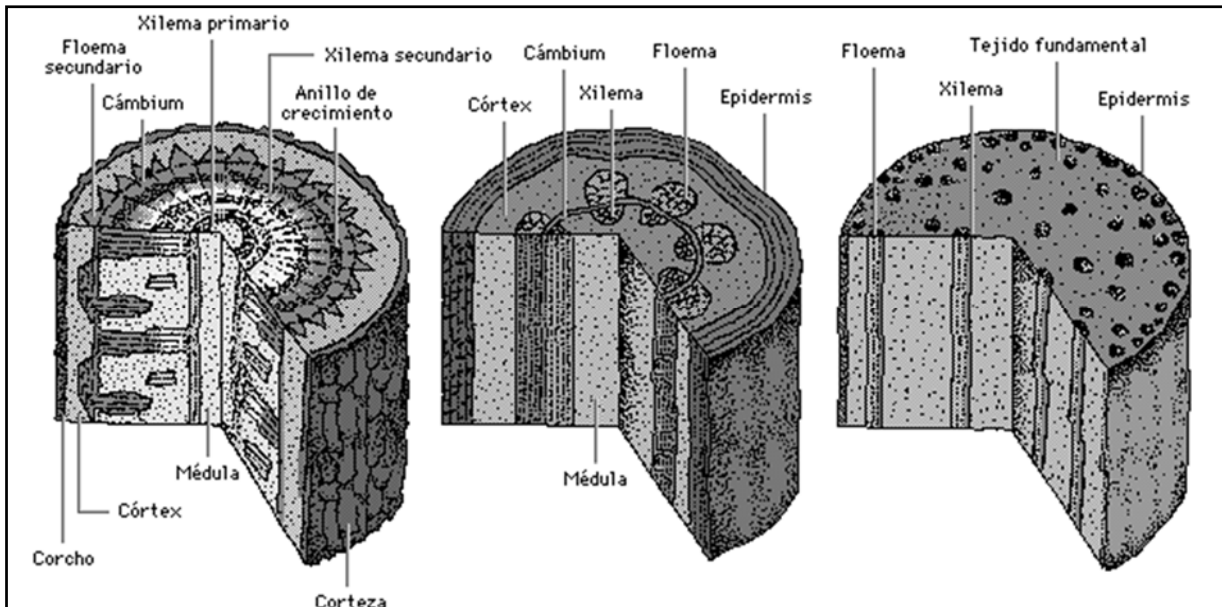
Los extractivos forman sólo una pequeña parte de la pared celular, pero pueden ser completamente importantes. En muchas especies el color o el olor de la madera son debido a los extractivos, algunos ejemplos de éstos son la lignina, los taninos, terpenos, y polifenoles. Las maderas resistentes a la descomposición, como la nuez negra o secoya, por lo general tienen un contenido de extractivo alto. Estas sustancias son llamadas extractivos porque pueden ser quitados o extraídos de la madera calentándolo en el agua, alcohol, o varios otros productos químicos [2].

### **1.4 Estructura de la madera**

Los árboles crecen por la incorporación sucesiva de numerosas capas de tejido leñoso en el tallo que envuelven a la plántula original. El eje de esta plántula, formado por la raíz y el tallo, está dividido en tres capas principales. La más externa, llamada epidermis, está formada por células de paredes delgadas y protege los tejidos internos del eje. La capa central o córtex es un aglomerado de células más grandes de pared fina que funcionan durante un tiempo como células de almacenamiento.

La capa interna o estela consta de un anillo de células pericíclicas resistentes, un anillo pluricelular de células de floema, un anillo pluricelular de células de xilema o leñosas y un núcleo interior de células de paredes delgadas llamado médula.





Tallo leñoso

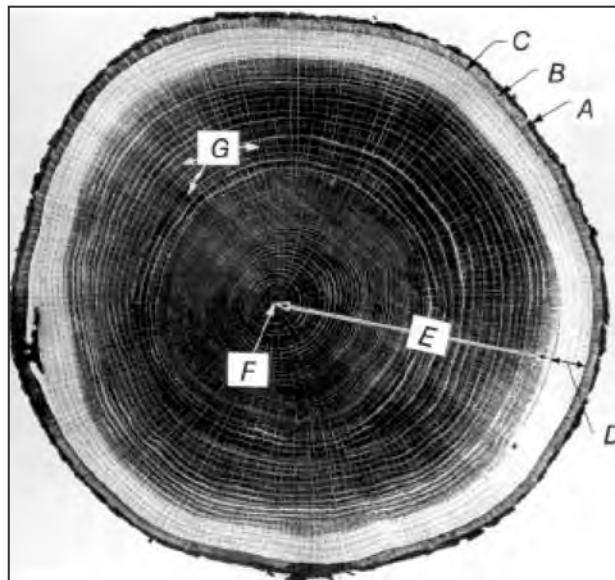
Tallo de herbácea  
dicotiledóneaTallo de herbácea  
monocotiledónea**Figura 1.2.-** Estructura del tallo de las angiospermas (monocotiledóneas, y dicotiledóneas), [5]

Todos estos tipos de plantas (monocotiledóneas, y dicotiledóneas) tienen en común varios tejidos básicos: vascular (xilema y floema), que conducen agua y nutrientes a las células de la planta; en el centro del tallo se forma la médula que rodea al tejido vascular y dérmico, que forma una capa protectora. No obstante, muchas plantas herbáceas presentan sólo crecimiento primario, debido a la división celular activa en el ápice del tallo. Todas las monocotiledóneas y algunas dicotiledóneas tienen tallos herbáceos, aunque varía la disposición interna de xilema y floema. Entre las angiospermas, sólo las dicotiledóneas experimentan crecimiento secundario, que provoca el engrosamiento del cuerpo de la planta. El xilema forma madera en ciclos anuales de crecimiento que dan lugar a los anillos visibles en el corte transversal del tronco.

En la figura 1.3 se muestra un corte transversal de un árbol en donde se pueden observar los rasgos característicos de la madera; la corteza, que puede ser dividida en una parte muerta también llamado corcho (A), cuyo grosor varía enormemente según la especie y la edad de los árboles, y una parte viva interior (B), que lleva los nutrientes de las hojas a las partes en crecimiento del árbol; la madera de un árbol comúnmente se clasifica en albura (D),

duramen (E); y médula (F), que es un pequeño corazón de tejidos localizado en el centro del tallo del árbol, sobre el cual el crecimiento de madera inicial ocurre. La albura es por lo general de un color más claro que el duramen y es muy susceptible de ser atacada por organismos biológicos. La albura es la parte activa del xilema, que en el árbol vivo, contiene células vivas y material de reserva [2]. La albura conduce gran cantidad de agua y de sales en solución, de la raíz a las hojas; provee rigidez al tallo y sirve de reservorio de sustancias de almacenaje [7]. El ancho de la albura en la sección transversal es variable según la especie, así como de la edad del árbol.

El duramen está constituido por las capas internas del leño, no contiene células vivas y los materiales de reserva que en ella existían se han transformado en compuestos fenólicos propias del duramen [8]. El duramen generalmente es de un color más oscuro que la albura, aunque la diferencia puede no ser claramente distinguible, popularmente se le conoce como el corazón de la madera, está formado por un cambio gradual de la albura. Los rayos de madera (G), son el tejido horizontalmente orientado por el plano radial del árbol. Los rayos unen varias capas de la médula para lograr el almacenaje y el transporte de los nutrientes. La capa cambium (C), que está dentro de la corteza interior en forma de madera y células de corteza, puede ser vista sólo con un microscopio.



**Figura 1.3.** Corte transversal de un tronco de roble blanco: (A) la corteza externa (tejido muerto), (B) corteza interior (tejido vivo), (C) cambium, (D) albura, (E) duramen, (F) médula, y rayos de madera (G). [4]



El crecimiento del grosor de la corteza y la madera es causado por la división de células en el cambium (figura 1.3). Ningún crecimiento de diámetro ocurre en la madera fuera de la zona del cambium; el nuevo crecimiento es puramente la adición y el crecimiento de nuevas células, no el desarrollo adicional de las anteriores. Las nuevas células son formadas por dentro del cambium y también se forman nuevas células de corteza en el exterior. Así, la nueva madera desplaza al exterior la vieja madera y el diámetro del tronco aumenta. En la mayor parte de las especies, la corteza existente es empujada hacia fuera por la formación de la nueva corteza, y las capas de corteza más externas se estiran, causando grietas; y finalmente son desechadas.

En general, el duramen consiste en células inactivas que no funcionan en conducción de agua o en almacenaje de comida. La transición de albura a duramen es acompañada por un aumento del contenido de extractivo. Con frecuencia, estos extractivos oscurecen el duramen y dan a ciertas especies como la nuez negra y la cereza su color característico. Los extractivos del duramen también pueden afectar la madera pues reducen la permeabilidad, aumentando el tiempo de secado del duramen y dificulta la impregnación de preservativos químicos. Sin embargo, cuando la albura se cambia a duramen, ninguna célula es añadida o llevada, tampoco cualquier célula cambia de forma. La fuerza básica de la madera no es esencialmente afectada por la transición de células de albura a células de duramen [2].

#### **1.4.1 Anillos de crecimiento**

En la mayoría de las especies de climas templados, la diferencia entre la madera que se forma inicialmente en la primera temporada de su cultivo y la que se forma más tarde es suficiente para producir anillos de crecimiento anuales distintos, (figura 1.4). La edad de un árbol en el tronco o la edad en cualquier corte transversal del tronco pueden ser determinadas contando estos anillos. Sin embargo, si el crecimiento del diámetro es interrumpido, por sequía o defoliación por insectos por ejemplo, más de un anillo puede ser formado en la misma temporada. En tal acontecimiento, los anillos interiores por lo general no tienen límites definidos y son llamados anillos falsos. Los árboles que han perdido por casualidad la mayor parte de su follaje pueden formar una capa de crecimiento incompleta, a veces llamada un anillo discontinuo.

---



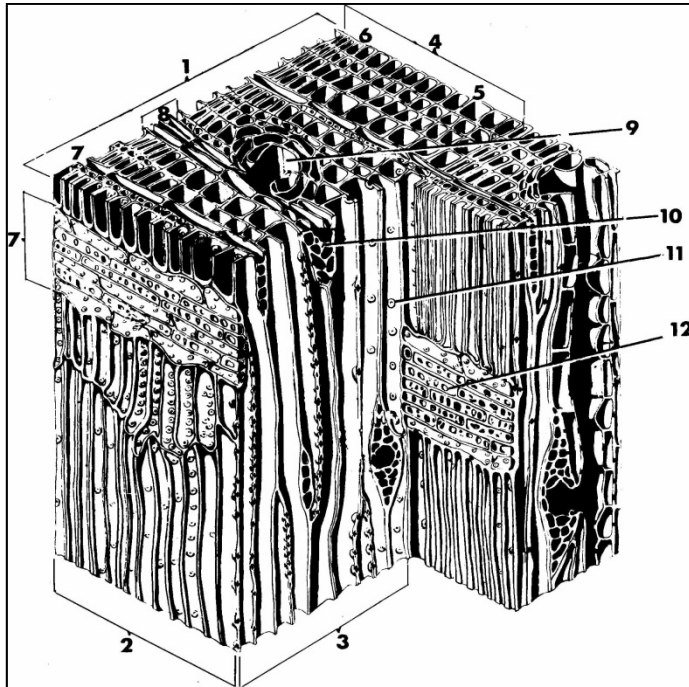
**Figura 1.4.** Corte transversal de un tronco de pino de ponderosa mostrando sus anillos de crecimiento. Las cintas de color más clara es la madera temprana y las cintas oscuras es la madera tardía. Un anillo anual (crecimiento) está formado de una zona de madera temprana interior y una zona de madera tardía externa [6].

El tiempo real de la formación de estas dos partes de un anillo puede variar con las condiciones ambientales y meteorológicas. La transición de madera temprana a madera tardía puede ser gradual o abrupta, dependiendo del tipo de madera y de las condiciones de crecimiento en la cual se formó.

#### **1.4.2 Madera temprana y tardía**

Las células formadas en la primavera y a principios del verano son más amplias en la dirección radial, y son más cortas que aquellas producidas más tarde en verano. Las células delgadas y amuralladas comprenden la madera temprana y a las células más gruesas se les denomina madera tardía. Cada anillo de crecimiento consiste tanto de madera temprana como de madera tardía. Así, al mirar un corte transversal, (**figura 1.5**), uno puede ver las filas alternas de la madera temprana de color claro y de la madera tardía que es de color más oscuro. Contando el número de anillos de madera temprana entre la médula, que está en el mismo centro del tallo, y la corteza, podemos decir la edad del árbol en aquella altura en

particular. Casi todas las células derechas en maderas blandas son relativamente largas con extremos puntiagudos. Éstas son llamados traqueidas y apoyan el árbol en el suministro de líquidos de las raíces a la copa del árbol.



1. Sección lateral
2. Sección radial
3. Sección tangencial
4. Anillo anual
5. Madera temprana
6. Madera tardía
7. Rayo de madera
8. Rayo fusiforme
9. Conducto de resina
10. Conducto de resina
11. Poro interconectado
12. Poro simple

**Figura 1.5.** Estructura de la madera blanda [6]

### **1.4.3 Rayos de madera**

En la **figura 1.5** se observan los rayos de madera en la sección radial. Esto es lo que veríamos si cortamos el tallo a lo largo del radio de la médula a la corteza. Las células de rayo tienen una forma alargada que está horizontalmente en el árbol. Un rayo puede consistir en sólo en una célula de rayo, este puede contener un conducto de resina horizontal que corre a lo largo del centro, este es llamado un rayo fusiforme [1].

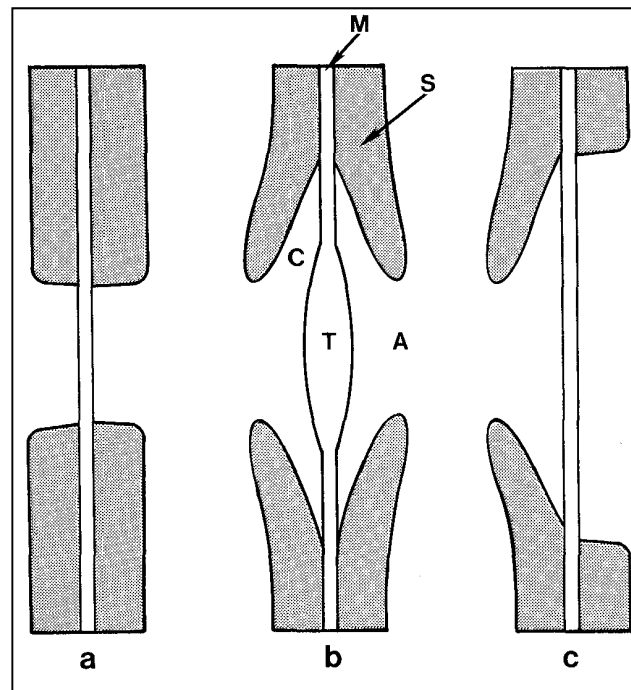
### **1.4.4 Conductos de resina**

Los conductos de resina pueden correr de arriba a abajo u horizontalmente en un tallo, **figura 1.5**. Un conducto de resina es formado por un espacio entre varias células que se amplían para formar una apertura grande en la madera. Como sería esperado del nombre, estos

conductos son por lo general llenos de la resina pegajosa, que es liberada por las células que están en los capilares [3].

#### **1.4.5 Poros**

El paso de nutrientes de célula a célula se realiza por pequeñas aperturas en la pared celular, éstas aperturas se les denomina poros [1]. Cuando las paredes celulares de dos células adyacentes se desarrollan, las pequeñas depresiones circulares son dejadas en la pared secundaria que se espesa. Por lo general las depresiones ocurren frente al otro en células contiguas, de modo que se forman poros contiguos en una membrana, formada de las dos paredes primarias y la capa intercelular, entre las dos cavidades de los poros como se observa en la **figura 1.6**.



**Figura 1.6.** Los tres tipos básicos de poros: (a) par de poro simple; (b) poro interconectado; (c) poro semi-interconectado. A abertura; C cámara; M pared media de membrana-primaria; S pared secundaria; T tálamo. [1].

La membrana del poro actúa como un filtro y también como la parte de la pared de apoyo. Los tres tipos básicos de poros se encuentran tanto en maderas blandas como en maderas duras y se pueden observar en la figura 1.6. El poro doble simple (a) está por lo general localizado entre dos células de parénquima o depósitos celulares. El poro semi interconectado (c) se encuentra generalmente entre una prosénquima y una célula de



parénquima. El poro interconectado (b) es el más común de los tres tipos y está localizado entre dos células prosénquima en forma longitudinal. Este tipo de poro es el más importante para el transporte fluido porque interconecta dos células de conducción.

### **1.5 Estructura anatómica de madera**

La conductividad térmica de la madera es una propiedad dependiente de la estructura. Esto varía en las tres direcciones principales de la madera: dirección longitudinal (paralela al centro, a lo largo de un árbol), dirección radial (perpendicular al centro, a lo largo del radio del árbol redondo en el corte transversal), y dirección tangencial (perpendicular al centro, tangente a cada anillo de crecimiento) [11]. La estructura anatómica de la madera en estas tres direcciones es diferente y la mayor parte de las propiedades anisotrópicas de la madera son debido a esta diferencia de estructura.

El componente de la mayoría de especies de madera blanda son las traqueidas, células longitudinales muy delgadas, que ocupan aproximadamente el 90-95 % del volumen de madera total [12]. Las traqueidas se forman en la etapa temprana del crecimiento del árbol; son células delgadas y amuralladas con diámetros mayores, mientras aquellas formadas más tarde en el año son células gruesas y amuralladas con diámetros más pequeños. Las traqueidas dan a la madera blanda la fuerza mecánica requerida, aseguran el calor y el transporte de la savia. La transferencia de calor en la madera es principalmente por la conducción por las paredes celulares, y en parte por la convección de aire en los lúmenes celulares. La masa (humedad) transferida en la madera de una traqueida a otra, ocurre por los poros interconectados. Hay numerosos poros en las paredes celulares radiales de las traqueidas, y sólo unos cuantos en las paredes tangenciales.

Gong [12] mencionó que hay aproximadamente 200 poros en cada traqueida en la madera temprana. Otro tipo importante de células en la madera blanda son las células de radio medular, que incluyen a las traqueidas y la parénquima que fluye en el sentido perpendicular del radio en dirección al centro. Los radios medulares de la madera blanda son una de muchas células en la albura. Las células de radio medular son pequeñas comparadas a las traqueidas longitudinales. Los canales de resina son otra característica para las especies de madera



blanda, sobre todo en el pino. Un género de madera blanda típico es el pino. El pino amarillo del sur (*Pinus spp.*) es un grupo de especies popular para la aplicación de construcción en América, y el pino rojo (*P.resinosa*) es una especie popular para la industria de la construcción europea. La figura 1.7 y la figura 1.8 muestran la estructura general de estas dos especies [13]

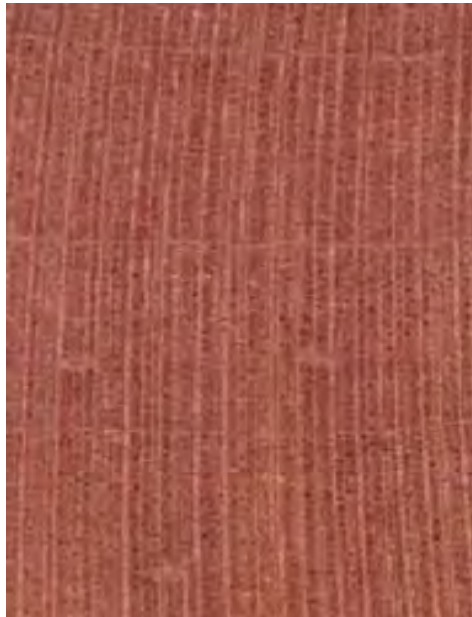


**Figura 1.7.** Pino amarillo del Sur (*Pinus spp.*) estructura de corte transversal 20x [14].



**Figura 1.8** Pino Rojo (*P.resinosa*) estructura de corte transversal 20x [8].

Las maderas duras son formadas por diversos arreglos de células, y de diversos tamaños de rayos. Un tipo principal de células son las células de conducción especializadas llamadas vasos. Estos son muy grandes en el diámetro con paredes muy delgadas. Todos los vasos y las fibras tienden a ser doblados en el corte transversal comparado con la forma casi rectangular de las traqueidas de la madera blanda. Las maderas duras se caracterizan por tener rayos muy grandes, que tienen un efecto significativo en algunas propiedades físicas de la madera. En general, comparando la madera blanda con la estructura de la madera dura, la madera blanda es más homogénea mientras la madera dura es relativamente heterogénea. Como un ejemplo de especies de madera dura, la estructura microscópica del arce rojo es mostrada en la figura 1.7 [15].

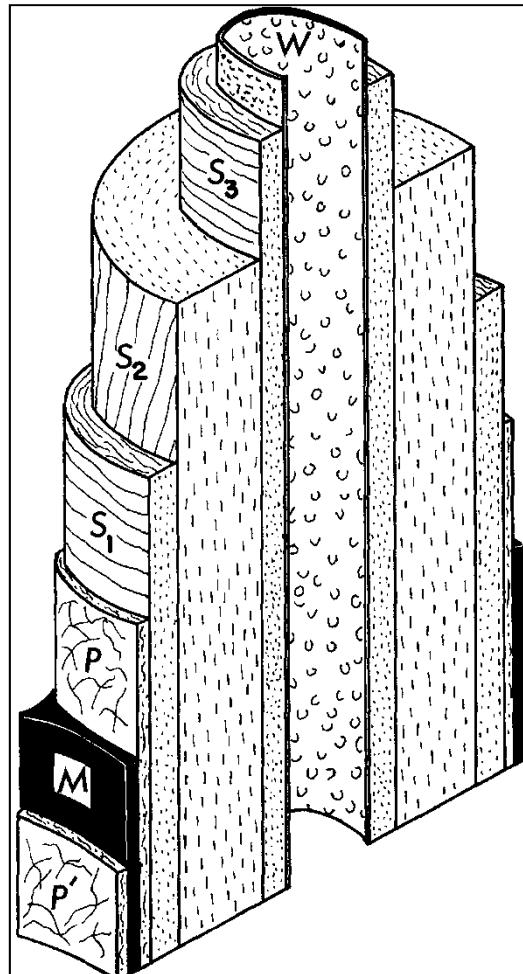


**Figura 1.9** Arce Rojo (*Acer rubrum*) estructura de corte transversal 20x [15].

La orientación de las fibras en las paredes celulares de la madera afecta la mayor parte de los valores de conductividad térmica, el contenido de humedad y la gravedad específica [11]. La estructura de la pared celular se caracteriza por 3 capas como se observa en la figura 1.8. Las capas exteriores (S1) e interior (S3) son delgadas comparadas a la capa media de la pared secundaria. La capa secundaria toma aproximadamente el 90-95 % de la pared de célula entera. Esto juega un papel principal en las propiedades mecánicas.

Las microfibras en la capa secundaria son orientadas de  $10^\circ$  a  $30^\circ$  del eje de célula, y

son casi paralelos al eje largo de la célula cuando son observados bajo el microscopio. Esta orientación es responsable de la diferencia significativa en muchas propiedades físicas entre la dirección longitudinal y transversal, como la conductividad térmica. Wangaard [16] mostró que las desviaciones de conductividad térmica transversales en el abeto Douglas son enormemente dependientes de la variación de la orientación de la microfibras.



**Figura 1.10** Vista esquemática de la pared celular de una traqueida. P=pared primaria; M = Membrana intermedia; S1 = capa externa de la pared secundaria; S2 = capa media de la pared secundaria; S3 = capa interior de la pared secundaria; W = membrana rugosa que alinea el lumen celular. P'= pared primaria de células contiguas [6].



## **1.6 Conductividad térmica de la madera**

La madera es un material higroscópico poroso. La conductividad térmica muestra tener una relación muy cercana con la estructura de madera y la humedad. La capacidad de un material para conducir calor a consecuencia de la transmisión de vibraciones moleculares de un átomo o molécula al otro varía enormemente según la naturaleza química del material y su estructura o textura [17]. La conductividad térmica,  $k$ , es expresada en términos de cantidad del calor,  $Q$ , que fluye a través del grosor,  $x$ , de un material con un corte transversal,  $A$ , bajo la diferencia de temperatura de unidad entre las dos superficies,  $T$ , en el tiempo,  $t$ : como se muestra en la ecuación 1.1, [11].

$$k = \frac{Q * x}{A * T * t} \quad \text{(Ecuación 1.1)}$$

La conductividad de calor en la madera es dependiente de varios factores con el grado variante de la importancia. Las variables más significativas que afectan el flujo del calor en la madera son:

- 1). densidad de madera;
- 2) contenido de .humedad en la madera;
- 3) la .dirección del flujo de calor con respecto al centro
- 4) densidad relativa de la madera
- 5) .extractos o sustancias químicas en la madera, y defectos, etc...

Estos factores afectan la conductividad térmica de la madera, Van Dusen [18]. encontró que había casi una relación lineal entre conductividad y densidad. También lo hizo Rowley [9] en su investigación preliminar en 1929, en más de 100 especies, encontró una indicación de una relación lineal entre la conductividad y densidad; y entre el contenido de humedad y la conductividad. MacLean [11] hizo un estudio sistemático de cinco años en 32 especies de madera, comprendiendo tanto maderas blandas como maderas duras, probó el efecto de densidad diferente y contenido de humedad diferente en la madera en la conductividad de calor. Los experimentos de MacLean fueron hechos con varias especies con el contenido de humedad en los límites de 0, es decir aquella madera en la condición verde,



también hizo varias pruebas en el abeto Douglas para comparar la conductividad en las direcciones radiales y tangenciales. encontró que los resultados basados en las muestras secas por el horno que la conductividad era, en general, directamente proporcional a la gravedad específica. La ecuación empírica de sus resultados de prueba fue concluida como se muestra en la ecuación 1.2.

$$k = 1.39 * S + 0.165 \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{k}) \quad \text{(Ecuación 1.2)}$$

Donde, S=gravedad específica;

Urakami y Fukuyama [19]. más tarde usaron una técnica avanzada para examinar la influencia de la densidad ( $\rho$ ) en la conductividad térmica tangencial del centro del tronco, y establecieron la relación en la ecuación 1.3:

$$k = 0.0174 + 1.86 * 10^{-4} * \rho \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{k}) \quad \text{(Ecuación 1.3)}$$

La influencia significativa del contenido de humedad en la conductividad térmica de la madera es fácil de entender, ya que la madera es un material poroso, dada su naturaleza, esto origina una capa de aislamiento de aire muerto en los lúmenes celulares.

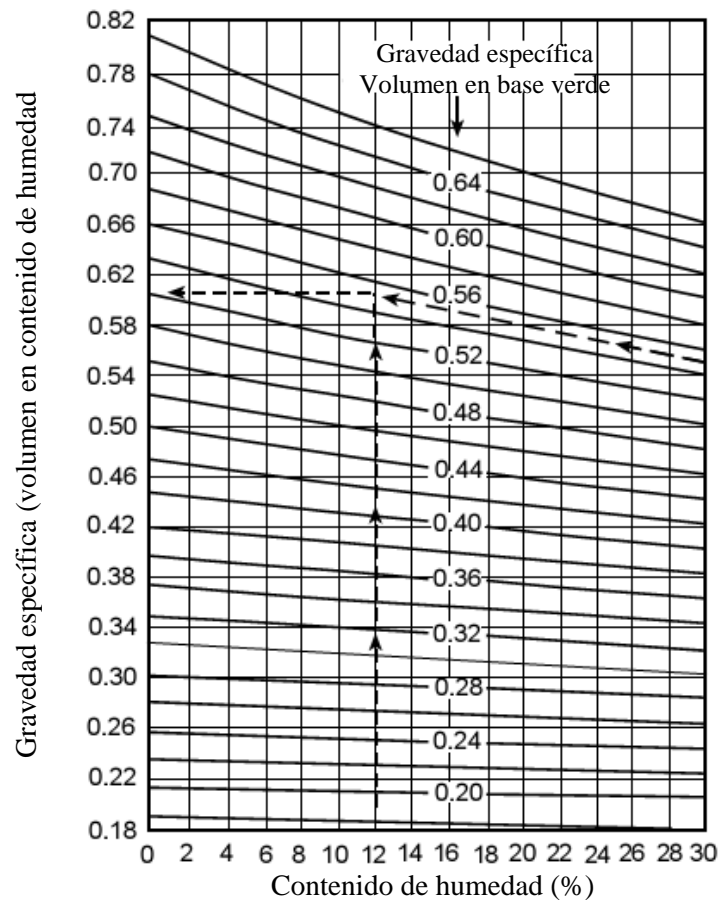
### **1.7 Gravedad específica y peso de madera**

La gravedad específica es una propiedad física de la madera que sirve de referencia de la facilidad de secado de una madera así como un índice de peso, por lo que es factor adimensional. En general, mientras más pesada es la madera, más despacio es la velocidad de secado y es mayor la probabilidad de desarrollar defectos durante el secado. La definición tradicional de la gravedad específica es la proporción de la densidad de la madera a la densidad del agua en una temperatura de referencia especificada (a menudo 4.4°C) donde la densidad del agua es 1.0000 kg/cm<sup>3</sup> [10] y con un contenido de humedad del 12% o en madera verde, ecuación 1.4.

$$\text{densidad} = \frac{\text{peso en base seca}}{\text{Volumen en condición inicial}} \quad \text{(Ecuación 1.4)}$$

Para reducir confusión introducida por la variable del contenido de humedad, la gravedad específica de la madera por lo general está basada en el peso en base seca y el volumen en un contenido de humedad específico. Algunos datos de gravedad específica se muestran en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2.** Relación entre la gravedad específica y el contenido de humedad [10].



La gravedad específica puede ser calculada mediante la consulta de tablas, como la tabla 1.2 [6] es un aproximado de las especies más comerciales de Norteamérica, teniendo una variación del  $\pm 10\%$  y mediante métodos matemáticos, a continuación se describe uno en la ecuación 1.5, basado en el trabajo de Simpson [10].

$$\rho = 1,000 G_m (1 + M/100) \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \text{(Ecuación 1.5)}$$



Donde:

$\rho$  = Densidad

$G_m$  = gravedad específica básica (basado en el volumen verde).

$M$  = Contenido de humedad (porcentaje en base húmeda)

### **1.8 Relaciones entre el agua y la madera.**

Varios libros de texto han cubierto este aspecto [1], [2], [19]. La madera de árboles vivos y los troncos recién talados contiene una cantidad grande de agua, que a menudo constituye una mayor proporción en peso que el material sólido por sí mismo. El agua tiene una influencia significativa en las propiedades de madera, afectando su peso, fuerza, encogimiento, y protección para resistir el ataque de algunos insectos y hongos que causan decoloraciones o hasta la degradación de la madera [2], [8], [17]. La madera se diferencia de la mayor parte de materiales usados para la construcción en la cual esta cambia continuamente por la humedad (agua) con sus alrededores, más considerablemente que hormigón o ladrillo.

El agua en la madera puede estar presente en dos formas:

- (i) **Agua libre**: el volumen de agua contenida en las cavidades celulares es libre de la acción de la atracción intermolecular de las paredes celulares y sólo es contenida por fuerzas capilares, es, por lo tanto llamada el agua libre. El agua libre no está en el mismo estado termodinámico que el agua líquida que está contenida en los canales resiníferos o espacios intercelulares, debido a la fuerza adicional debido al efecto capilar de los lúmenes de célula [20], que son 20 a 300  $\mu\text{m}$  en el diámetro [17].
- (ii) **Agua ligada o higroscópica**: el agua ligada está contenida en los huecos de las paredes celulares y más íntimamente ligadas con la madera en su estructura submicroscópica [8], La atracción de madera con el agua proviene de la presencia de grupos de hidroxilos libres (OH) en la estructura química y del arreglo de la celulosa, hemicelulosa y moléculas dentro de la pared de célula





[18], [21], [22]. Los grupos hidroxilos tienen cargas eléctricas negativas, y ya que el agua es un líquido polar que consiste en un hidroxilo negativo (OH), los grupos hidroxilos libres en la celulosa atraen y sostienen el agua por la vinculación de hidrógeno. El agua contenida en las paredes celulares por las ligaduras de hidrógeno es llamada el agua ligada.

### **1.8.1 Contenido de humedad de la madera.**

El contenido de humedad de una muestra particular significa cuánta agua está presente en la muestra. El contenido de humedad de la madera es generalmente expresado como un porcentaje del peso seco de la madera y es calculado según **ecuación 1.6** [19]:

$$X(\%) = \frac{m_g - m_{od}}{m_{od}} \times 100 \quad \text{(Ecuación 1.6)}$$

Donde:

$m_g$ : es la masa verde de la madera

$m_{od}$  = masa seca en base seca

### **1.8.2 Punto de saturación de fibra.**

Cuando la madera verde se seca, el agua libre deja las cavidades celulares primero porque es contenida por fuerzas capilares más débiles que el agua ligada. Además, las propiedades físicas, como fuerza y encogimiento, no son afectadas por el retiro de agua libre ya que el agua libre no está ligada a las paredes celulares

El punto de saturación de fibra (FSP) es definido como el contenido de humedad en el cual el agua libre está completamente ausente de las cavidades celulares, pero las paredes celulares están prácticamente saturadas con el agua ligada. El FSP es el valor restrictivo entre estas dos formas del agua (libre y ligada) [20]. En la mayor parte de las maderas, el valor del punto de saturación de fibra es el 25 a 30 % del peso en base seca. Para muchas especies diferentes de madera. Keey. [17], definió el punto de saturación de fibra como el contenido de humedad de equilibrio de una muestra de madera en un ambiente de la humedad relativa del



99 %, si la condensación capilar se efectúa en poros (menores de 0.1  $\mu\text{m}$ ) y tener diámetros cilíndricos equivalentes. Su definición cedería a un punto de saturación de fibra para las especies comerciales más comunes entre 30 y el 32 % (base seca) en la temperatura ambiente, después de la desorción.

Muchas propiedades importantes de la madera muestran un cambio considerable cuando la madera es secada debajo del punto de saturación de fibra. Algunas de estas propiedades se describen a continuación:

- i) Idealmente ningún encogimiento ocurre hasta que un poco de agua ligada se pierda, es decir hasta que la madera sea secada por debajo del FSP. Sin embargo, el punto de saturación de fibra es probablemente algo de una idealización porque no es posible ver el punto exacto donde no hay agua libre pero las paredes celulares están completamente saturadas. En realidad, una pequeña cantidad de agua libre todavía puede estar presente cuando el agua ligada comienza a escaparse.
- ii) La mayor parte de propiedades de fuerza, excepto la disminución en el impacto que dobla la fuerza y, en algunos casos la dureza, muestran un aumento consecuente con la primera pérdida de agua ligada cuando la madera comienza a secar debajo del FSP [2],
- iii) La resistencia eléctrica aumenta lentamente sólo con la pérdida de agua libre, mientras que ésta aumenta muy rápidamente con la pérdida de agua ligada cuando la madera se seca por debajo del FSP.

### **1.8.3 Contenido de humedad de equilibrio**

La madera es una sustancia higroscópica, es decir, tiene la capacidad de recoger o emitir la humedad en la forma de vapor. El agua contenida en la madera ejerce una presión de vapor dentro de sí misma, que es determinado por el tamaño máximo de los tubos capilares llenos de agua en cualquier momento. Si la presión de vapor de agua en el espacio ambiental

---



es inferior que la presión de vapor dentro de la madera, la desorción ocurre. Los tubos capilares más grandes, que están llenos de agua entonces, se vacían primero. La presión de vapor dentro de la madera decae, junto con el agua contenida en tubos capilares clasificados más pequeños y más pequeños. La etapa final es alcanzada cuando la presión de vapor dentro de la madera iguala la presión de vapor en el espacio ambiental encima de la madera, y desorción cesa. La cantidad de humedad que permanece en la madera en esta etapa está en el equilibrio con la presión de vapor de agua en el espacio ambiental, y es llamada el contenido de humedad en equilibrio o EMC [10]. A causa de su higroscopocidad, la madera tiende a alcanzar un contenido de humedad que está en el equilibrio con la humedad relativa y la temperatura del aire circundante.

El EMC de madera varía con la humedad relativa ambiental (una función de la temperatura) considerablemente. Siau [23], mencionó que el EMC también varía con la especie, tensión mecánica, densidad, contenido de extractivos y la dirección de sorpción en el cual el cambio de humedad ocurre (es decir adsorción o desorción).

#### **1.8.4 Contenido de humedad de madera en servicio.**

La madera retiene sus características higroscópicas después de que es puesta en uso. Esta sujeta entonces a la humedad fluctuante, el factor dominante en la determinación de su EMC. Estas fluctuaciones pueden ser más o menos cíclicas, como cambios diurnos o cambios estacionales anuales.

A fin de reducir al mínimo los cambios del contenido de humedad de madera, la madera es por lo general secada a un contenido de humedad que está cerca de las condiciones de EMC medias a las cuales será expuesto. Estas condiciones varían para usos interiores comparado con usos exteriores en una posición geográfica dada.

La razón primaria de secar madera a un contenido de humedad equivalente a su EMC medio en condiciones de uso es el de reducir al mínimo los cambios dimensionales (o movimiento) en el producto final.



Hoy en día el conocimiento de las propiedades de la madera, es de gran importancia dado que nos permite conocer el comportamiento de la misma durante el proceso de la misma, así como poder caracterizarla en diversos modelos matemáticos, sin embargo la gran cantidad de propiedades y cualidades de la madera hacen de esto una labor muy difícil, sin embargo se ha logrado tener muy buenas aproximaciones al proceso de secado real, esto gracias a la profunda investigación y a los datos obtenidos durante numerosas investigaciones sobre las propiedades de la madera.

La finalidad de este capítulo es conocer las características de las propiedades de la madera que intervienen durante el proceso de secado, para una mayor comprensión sobre el trabajo aquí presentado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Siau, J.F. **Madera: Influencia de la humedad en las propiedades físicas**. Departamento de Ciencia de la Madera y Productos Forestales, Virginia Tech. 1995. pp. 2-7, 20-26.
2. Desch, RE. y Dinwoodie, J.M. **Madera: Estructura, Propiedades, Conversión y Uso**. Macmillan Press Ltd., Londres. 1996 306 p.
3. Stamm, A. J. **Ciencia de la madera y la celulosa**. Ronald Press, Nueva York. 1964, 509 p
4. Wood Handbook, 2000. **USDA, Forest Products Laboratory**, pp. 2-2, 2-3, 2-4, 12-1, 12-2, 12-4.
5. Fengel, D., y G. Wegener. **Química de Madera, Ultraestructura y Reacciones**. Berlín: Walter de Gruyter. 1984, pp. 14-17.
6. Rowell, R. **The Chemistry of Solid Wood**. Advances in Chemistry 207. American Chemical Society, Washington, DC. 1984.
7. Hook, D., C. Brown and R. Wetmore. **Aeration in trees**. Bot. Gaz. 133 (4): 1972. pp. 443-454.
8. IAWA. 1964. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy**. Committee on Nomenclatura International Association of Wood Anatomists. 186 p.
9. Rowley, F.B. **La conductividad de calor en la madera a diferentes temperaturas climáticas**. Calefacción, Tubería, y Aire Acondicionado. Volumen 5:313-323. 1933.
10. Simpson, William T., ed. **Dry Kiln Operator's Manual**. Agric. Handbook AH-188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1991.
11. MacLean, J.D. **Conductividad térmica de la madera**. Calefacción, Tubería y Aire Acondicionado. Vol 13, 1941. pp. 380-391.
12. Gong, L. **Estudio numérico-experimental teórico de la transferencia de calor y masa en la madera durante el secado**. Tesis de Doctor, Universidad de Estado de Washington, departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, 1992, pp. 18-21. Estados Unidos.
13. G.P.J. Diedericks. **Pore-Scale Modelling of Transport Phenomena in Homogeneous Porous Media**, Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch, South Africa. 1999.
14. Haygreen, J.G. and J.L. Bowyer, **Productos Forestales y Ciencia de la Madera, una introducción**. 3ª edición, Prensa de Universidad de Estado de Iowa / Ames. 199 p.



15. Hoadley, B.R. **Identificación de la madera, unos resultados exactos con instrumentos simples.** Prensa de Taunton, Newtown, 1980. Connecticut 06470-5506
16. Wangaard, F.F. 1969. **Trasmisividad del calor en la madera de pino amarillo del sur, conglomerada y contraparchado,** Ciencia de la Madera. Vol.2 (1):54-60.
17. Keey, RB., Langrish, T.AG. y Walker, J.C.F. **Secado de la madera en horno.** Springer, Berlín. (2000). 326p.
18. Van Dusen, M.S. **La conductividad térmica de los aislantes del calor.** J. Am. Soc. Heat. Vent. Eng. 1920. Vol.26:625-656.
19. Urakami, H. y M. Kuyuyama. **La influencia de la gravedad específica en conductividad térmica de madera.** Universidad de Kyoto.. Volumen 25: 1981, pp.38-45
20. Langrish, T.AG. y Walker, J.C. **Procesos de Transporte en la Madera.:** Walker, J.C.F. Chapman y Pasillo, Londres. (1993. Pp.. 121-152.
21. Panshin, A.J. de Zeeuw, C. **Libro de texto, Tecnología de la Madera.** Volumen 1, Tercera Edición. McGraw-Hill, Nueva York, 1970. 705 p.
22. J.P. Du Plessis, J.H. Masliyah, **Mathematical modelling of flow through consolidated isotropic porous media,** Transp. Porous Med. 3 (1988), pp.145–161.
23. Siau, J.F. **Procesos de transporte en la madera,** Verlag, NewYork. 1984. 245 p.



## CAPÍTULO 2

### PROCESO DE SECADO DE LA MADERA

#### 2.1 Principios del secado

El proceso de secado es una operación unitaria que involucra la transferencia de calor y masa simultánea cuyo objetivo es el retiro de la humedad de un material [1] de forma económica y con el menor daño posible.

Con el secado se persigue:

1. Reducir la humedad de la madera hasta el contenido de humedad más adecuado para su uso final.
2. Secar la madera de forma económica, con un mínimo de defectos, en el tiempo más corto y con el menor uso de la energía.

Con el secado de la madera se busca darle un valor agregado a la misma. Sin embargo, los procesos de secado convencionales actualmente usados, a menudo pueden causar problemas de calidad debido a grietas, tanto externas como internas, ocasionando la reducción del valor del producto [2]. Así el secado apropiado en condiciones controladas (antes del uso) es de gran importancia en la utilización de la madera en cualquier país, donde las condiciones climáticas varían significativamente con la época del año.

El secado, es recomendable que se realice después de la tala de árboles, con el objeto de proteger la madera contra la degradación primaria, ataque por ciertas clases de insectos y hongos. Los organismos, que causan degradación, generalmente no pueden prosperar en la madera con un contenido de humedad debajo del 20 % [3], esto es porque la madera seca es menos susceptible para degradarse que la madera verde (madera cuyo contenido de humedad es

---





superior al 20 %).

Independientemente de lo señalado anteriormente del secado de la madera, también hay que considerar los siguientes aspectos [4]:

1. La madera seca es más ligera, y por consiguiente los gastos de transporte se reducen.
2. La madera seca es más resistente que la madera verde ya que mejoran sus propiedades mecánicas.
3. Las maderas para la impregnación con preservativos tienen que ser correctamente secadas, en particular en caso de preservativos de tipo del aceite
4. Las propiedades eléctricas y térmicas de la madera mejoran con el secado.

Secar permite la economía a largo plazo en la utilización de madera, racionalizando la utilización de recursos naturales. El secado de la madera es así un área para la investigación y desarrollo, que concierne a muchos investigadores y a la industria la de madera.

## **2.2 Factores físicos que afectan el secado de la madera**

La madera es un material higroscópico, es decir adsorbe humedad cuando se expone a condiciones en que la presión relativa de vapor de la atmósfera circundante es mayor a la de la madera. Cuando se presentan las condiciones opuestas ocurre la desorción [4].

El método más común es extraer la humedad de la madera en forma de vapor de agua para lo cual es necesario suministrarle calor. Existen dos formas principales de cómo es que el calor se le puede hacer llegar a la madera. Una de ellas es el secado al aire libre o a temperaturas ordinarias del medio ambiente y la otra es en estufas en donde se eleva la temperatura artificialmente por arriba de la del medio ambiente sin exceder en la mayoría de los casos los 100°C. Ambas formas en realidad se pueden considerar fundamentalmente como la misma, ya que se usa el aire como el medio a través del cual se conduce el calor a la madera y recoge el vapor extraído [5].



El medio con el que seca la madera es el aire y son tres los factores principales que afectan la capacidad de secado de aire.

1. Calor: Afecta la evaporación de humedad de la superficie y también tiene un efecto profundo sobre la tasa de movimiento con la que se traslada la humedad a la superficie de la madera
2. Humedad: Afecta la tasa de evaporación de la humedad de la superficie de la madera a cierta temperatura.
3. Circulación de aire: Lleva el calor a la madera para lograr su efecto sobre la evaporación y también se lleva la humedad después que ésta se evaporó de la superficie de la madera.

### **2.3 Secado de madera: los mecanismos de movimiento de humedad**

El agua en la madera normalmente se mueve de zonas de mayor contenido de humedad a zonas de menor contenido de humedad [6]. En términos simples, esto significa que durante el secado el movimiento de humedad ocurre del centro hacia la superficie y esto significa que durante el secado es necesario expulsar la humedad de las zonas interiores de la madera. La madera, después de un período de tiempo, alcanza un contenido de humedad en equilibrio con el aire circundante (el EMC, como se menciona en el capítulo 1).

#### **2.3.1 Conductos de humedad**

Los movimientos de humedad dentro de la madera como líquido o vapor transitan por varios tipos de callejones según la naturaleza de la fuerza impulsora, (por ejemplo, presión o diferencial de humedad), y las variaciones en estructura de madera [7]. Estos caminos consisten en cavidades como son los vasos capilares, fibras, células de rayo, cámaras de puntuaciones, aperturas de membrana (poros), espacios intercelulares y los callejones de las paredes celulares transitorios. El movimiento del agua ocurre en estos callejones en cualquier dirección, longitudinalmente en las células, así como lateralmente, hasta que esto alcance las superficies secantes laterales de la madera [8]. La permeabilidad longitudinal más alta de la madera dura es



generalmente causada por la presencia de vasos. La permeabilidad lateral y el flujo transversal son a menudo muy bajos en maderas duras. Los vasos en maderas duras son a veces bloqueados por la presencia de nudos y resinas en algunas otras especies. La presencia de venas de resina, la formación de las cuales es a menudo un resultado de la respuesta protectora natural de los árboles a la herida, es comúnmente observada en la superficie de los bordes serrados de la mayor parte de eucaliptos. A pesar de la fracción de volumen generalmente más alta de rayos en maderas duras (típicamente el 15 % del volumen de madera), las células de rayos no son en particular eficaces en el flujo radial [7].

### **2.3.2. Espacio del movimiento de humedad**

El espacio disponible para el aire y la humedad en la madera depende de la densidad y la porosidad de la madera. La porosidad es la fracción de volumen del espacio vacío en un sólido. Siau [1] menciona que la porosidad es 1.2 al 4.6 % del volumen seco de la pared de célula de madera. Por otra parte, la permeabilidad es una medida con la cual los fluidos son transportados por un sólido poroso bajo la influencia de algunas fuerzas impulsoras (diferencial de presión capilar o diferencial de humedad). Está claro que los sólidos deben ser porosos para ser permeables, pero esto no necesariamente sigue esto todos los cuerpos porosos son permeables. La permeabilidad sólo puede existir si los espacios vacíos son interconectados por aperturas. Por ejemplo, una madera dura puede ser permeable porque hay interconexiones con aperturas en las membranas [9]. Si estas membranas son obstruidas o si los poros son bloqueados, la madera asume una estructura de bloqueo celular y puede ser prácticamente impermeable. La densidad es también importante para maderas duras impermeables porque mientras más material tenga la pared celular por distancia de unidad, ofrece mayor resistencia a la difusión [2]. De ahí que las maderas blandas, en general, sequen más rápidamente que las maderas duras. El transporte de fluidos es a menudo el flujo capilar (transferencia de ímpetu) para maderas blandas permeables en la temperatura alta mientras la difusión ocurre para maderas duras impermeables [7].



## **2.4 Fuerzas impulsoras para el movimiento de humedad.**

Son tres las fuerzas impulsoras principales para el movimiento de humedad: la acción capilar, la presión parcial del vapor de agua, y el contenido de humedad [1].

### a) Acción capilar

La acción capilar hace que el agua libre fluya, en su mayor parte por cavidades y pequeñas aperturas en las paredes celulares. Esto debido a la operación simultánea de las propiedades físicas de la adherencia y cohesión. La adherencia es la atracción entre partículas de agua y las paredes de las aperturas de membrana de puntuaciones, y la cohesión es la atracción de partículas de agua el uno para el otro. Cuando la madera verde comienza a secar, la evaporación del agua de las células superficiales establece fuerzas capilares que ejercen un tirón en el agua libre en las zonas de madera bajo las superficies, de modo que el agua líquida fluya.

### b) Diferencias de presión de vapor.

Cuando la acción capilar cesa, muchas de las cavidades celulares ahora contienen vapor de agua y aire. Las diferencias en la presión de vapor causan la humedad que está en el estado de vapor difundirse por las cavidades celulares, cámaras de puntuaciones, aperturas de membrana de puntuaciones, y espacios intercelulares.

### c) Diferencias de contenido de humedad.

Las diferencias del contenido de humedad originan movimientos a través de los capilares transitorios del agua líquida. Son muy importantes en el secado a bajas temperaturas (difusión). Opera únicamente a contenidos de humedad por abajo del punto de saturación de la fibra. Las moléculas de agua tienden a moverse de regiones de más atracción de la celulosa por el agua. Existe una diferencia de contenidos de humedad entre dos lados de la pared celular.

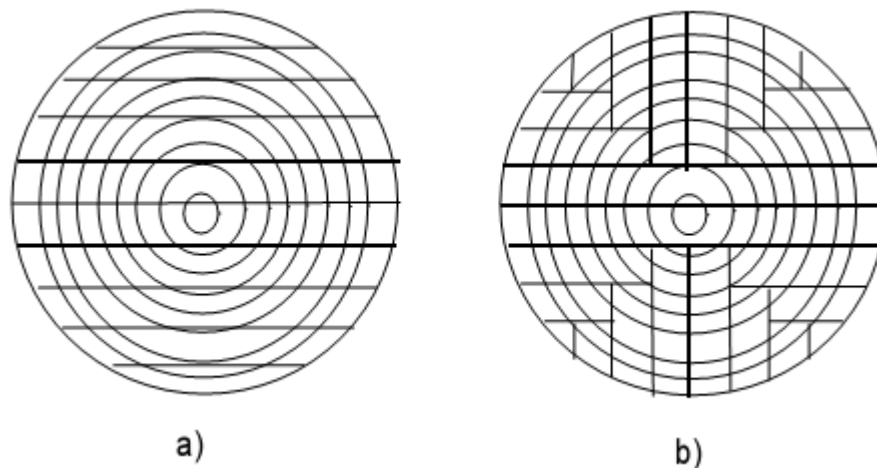
Algunos factores importantes en el movimiento de humedad por abajo del punto de

saturación de la fibra [4].

1. Baja temperatura: Menor movimiento de vapor y menos vibración de las moléculas de agua en las paredes celulares.
2. Altos contenidos de humedad: Entre más bajo sea el contenido de humedad es más difícil de extraer las moléculas de agua de la celulosa.
3. Altas gravedades específicas: Entre más sustancia-madera tenga que atravesar las moléculas de agua, será más lento el movimiento de humedad.

### **2.5 Direcciones del movimiento de humedad por difusión.**

La difusión radial es algo más rápida que la difusión tangencial. Aunque la difusión longitudinal sea la más rápida [7], esto tiene importancia práctica sólo cuando se secan trozos cortos. Generalmente los troncos de madera son mucho más largos de ancho que de grosor. Haque [8] realizó una prueba de secado con un tronco verde de tamaño típico de 6 m de largo, 250 mm de ancho y 43 mm en el grosor. Si los troncos son cortados en secciones (cortes alrededor de la médula), entonces la anchura estará en la dirección radial mientras que el grosor estará en la dirección tangencial, y viceversa para el serrado por espalda del tronco, como se observa en la **figura 2.1**. La mayor parte de la humedad es quitada de la madera por el movimiento lateral durante el secado



**Figura 2.1:** Modelo de corte en troncos de madera dura; (a) Corte plano (b), corte por secciones [8]



## **2.6 Motivos de hendiduras y grietas durante el secado y su control.**

La dificultad principal experimentada en el secado de madera es la tendencia de sus capas externas de desecarse más rápidamente que los interiores. Si se permite que estas capas sequen debajo del punto de saturación de la fibra mientras el interior todavía está saturado, las tensiones (llamadas tensiones de secado) surgen debido al encogimiento de las capas externas (debajo de PSF). La ruptura en los tejidos de madera ocurre, y por consiguiente se divide y las grietas ocurren si estas tensiones a través del centro exceden la fuerza a través de la fibra. El control acertado del proceso de secado consiste en el mantenimiento de un equilibrio entre la velocidad de evaporación de la humedad de la superficie y la velocidad del movimiento externo de la humedad del interior de la madera [1].

## **2.7 Condiciones higrotérmicas del aire.**

Las condiciones de secado externas (temperatura, humedad relativa y velocidad de aire) controlan las condiciones externas durante el secado, y de ahí la velocidad del secado, así como afectación de la velocidad del movimiento de humedad interno [2].

El aire generalmente no está seco, sino que mezclado con una cierta cantidad de agua. Cuando el aire atraviesa un trozo de madera, varía la cantidad de agua y el volumen de la mezcla, pero la cantidad de aire seco se mantiene constante. Las condiciones higrotérmicas del aire o las propiedades de la mezcla vapor de agua-aire seco, es lo que se conoce bajo el nombre de psicometría. Entre las propiedades del aire que participan en el proceso de secado de la madera, se pueden mencionar:

- a) humedad relativa
- b) temperatura de bulbo seco
- c) temperatura de bulbo húmedo
- d) contenido de humedad de equilibrio.

Otras propiedades del aire importantes son el punto de rocío, la humedad absoluta y la



entalpía.

Humedad relativa: Es definida como la presión parcial del vapor de agua dividido en la presión de vapor saturada en la misma presión de temperaturas y total [7]. Es decir la razón entre la cantidad real de aire que contiene y la máxima cantidad de agua que puede contener un determinado volumen de aire. Cuando el aire está seco, la humedad relativa es 0 % y si está saturado la humedad relativa es de 100 %. Si la humedad relativa se mantiene constante, mientras más se eleva la temperatura, más rápido es la velocidad de secado. La temperatura influye en la velocidad del secado aumentando la humedad que mantiene la capacidad del aire, así como acelerando la velocidad de difusión de la humedad por la madera [8]. La humedad relativa del aire determina la velocidad del secado a cualquier temperatura dada, especialmente en madera más húmeda, por lo que es de la mayor importancia su adecuado control durante el secado de la madera. La humedad relativa se determina con la carta psicrométrica conociendo la temperatura de bulbo seco y la temperatura de bulbo húmedo o el contenido de humedad de equilibrio.

Temperatura de bulbo seco: Es la temperatura leída en un termómetro de bulbo seco y mide la temperatura del aire ambiente.

Temperatura de bulbo húmedo: Es la temperatura leída en un termómetro cuyo bulbo se encuentra envuelto en un paño introducido en un pequeño recipiente con agua. Esta lectura es menor que la marcada por el bulbo seco, debido a la evaporación del agua, en una cantidad dependiente de la humedad ambiente. Se define también como la temperatura de equilibrio dinámico alcanzada por una superficie de agua cuando el coeficiente convectivo de transferencia de calor a la superficie, es igual al coeficiente de transferencia de masa desde la superficie, o sea, la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de equilibrio alcanzada por una pequeña masa de agua, expuesta bajo condiciones adiabáticas, a una corriente continua de aire.

El contenido de humedad en equilibrio (EMC) queda determinado por la temperatura y la humedad relativa del ambiente, no obstante, en la actualidad muchas instalaciones con control



automático del secado incorporan la medición del EMC, usando una chapa o lámina de madera muy delgada. Este procedimiento favorece la conducción automática del programa de secado mediante el coeficiente de secado, es decir, la relación entre el contenido de humedad de la madera y el contenido de humedad de equilibrio [9].

Con el aumento de la temperatura ambiente se seca el aire y le permite una mayor capacidad para captar agua, reduciendo de paso el contenido de humedad de equilibrio de la madera y por lo tanto la madera estará más seca. Así como el aire recoge la humedad que la madera esta evacuando por el secado, si la temperatura ambiente es mantenida constante, la humedad relativa aumenta, por la elevación del contenido de humedad absoluta del aire. Para poder mantener la humedad relativa constante durante un periodo del proceso de secado, es necesario evacuar al exterior una parte del aire del ambiente de secado y reemplazarlo por aire fresco, de menor contenido de humedad y recalentarlo.

### **2.8 Velocidad del aire.**

El tiempo de secado y la calidad de madera depende de la velocidad de aire y su circulación uniforme. A una humedad relativa y temperaturas constante, la velocidad de secado es más alta debido a la circulación rápida del aire a través de la superficie de madera, permitiendo el retiro rápido de la humedad que se evapora de la madera. Sin embargo, una velocidad de secado más alta no siempre es deseable, en particular para maderas duras impermeables, debido a que en las velocidades de secado muy altas se desarrollan mayores tensiones que pueden hacer que la madera se raje o se deforme [10].

**Tabla 2.1:** Velocidad del aire a través de- la madera en secado [2].

Tipo de secador	Especie	V (m/s)
Convencional	pino radiata	2.5 - 3.0
alta temperatura	pino radiata	> 5.0
convencional	Eucalipto	1.5 - 1.8

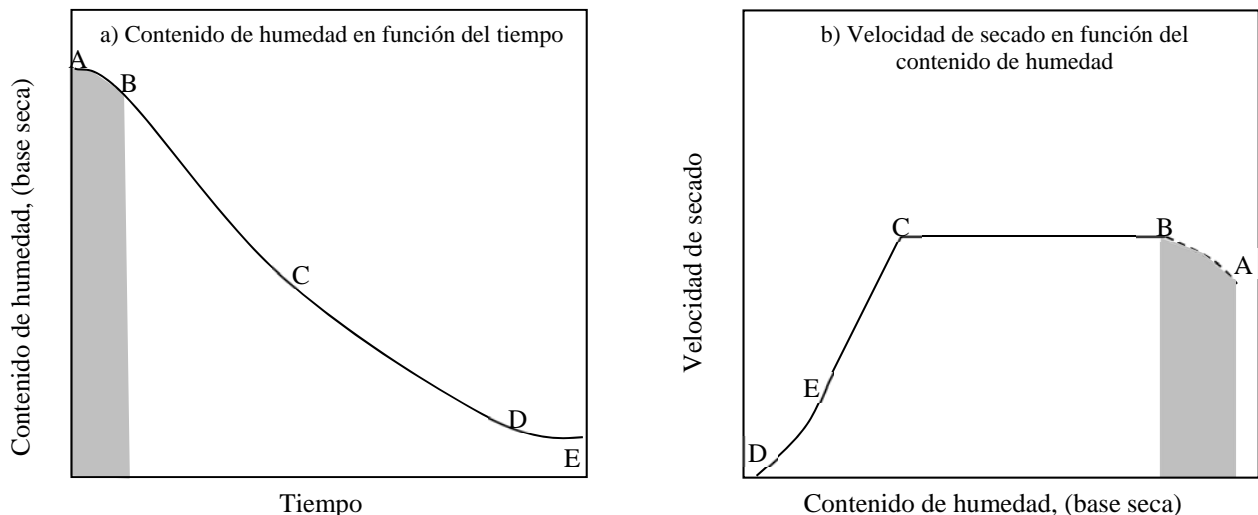


## 2.9 Etapas de secado

Las etapas de secado representan la variación de la humedad de la madera con el tiempo de secado o la velocidad de evaporación con el tiempo de secado. Keey [2] catalogó las etapas de secado en 3 fases o periodos (también pueden ser 4, ya que la etapa 3 esta sub-dividida en 2 fases), en relación del contenido de humedad de la madera con respecto al tiempo, estas son:

- a) Fase de atemperado
- b) Fase de velocidad de secado constante
- c) Fase de velocidad de secado decreciente.
  - o Primer periodo de velocidad decreciente.
  - o Segundo periodo de velocidad decreciente.

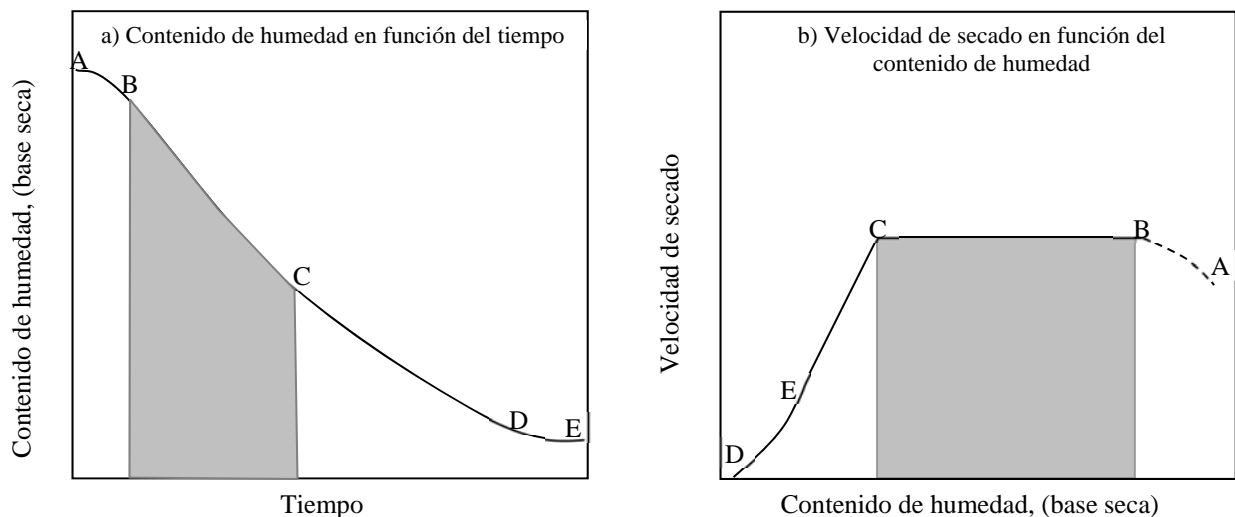
Fase de atemperado A-B: Este periodo también es conocido como periodo transitorio durante el cual se permite que la superficie del material por secar alcance la temperatura de bulbo húmedo de la corriente de aire de secado, regularmente este periodo es corto dependiendo del tipo de material.



**Figura 2.2** Fase de atemperado A-B, a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad [2]

Fase de velocidad de secado constante B-C: Se lleva a cabo a temperatura constante esto se debe a que la superficie del material se mantiene a condiciones de saturación y por lo tanto, la presión del vapor del agua en el medio poroso es igual a la presión de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo.

En esta etapa generalmente la superficie de la madera está cubierta de una película delgada de agua líquida y la evaporación se mantiene a una velocidad constante, esta etapa es más larga en maderas de menor espesor y de mayor permeabilidad; y es muy corta en maderas refractarias y de mayor grosor y es casi imperceptible en maderas previamente secadas o pre-secadas [10].



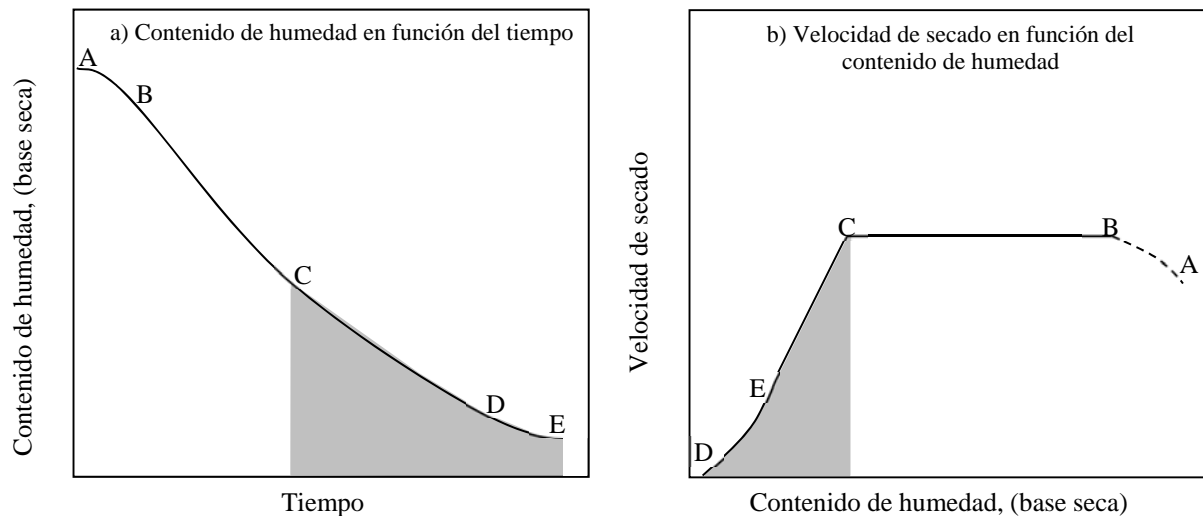
**Figura 2.3.** Fase de velocidad constante (B-C), a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad [2]

Fase de velocidad de secado decreciente C-D: Al final del período de velocidad de secado constante el material alcanza el contenido crítico de humedad, caracterizado porque el suministro de agua desde el interior del material es insuficiente para mantener la superficie en condiciones de saturación, se incrementa la resistencia del flujo de agua hacia esta, haciendo retroceder el frente de evaporación hacia el interior del material, paralelamente la temperatura en la superficie del material tiende a la temperatura del bulbo seco de la corriente de aire. Como consecuencia la velocidad de secado decrece.

En la fase de velocidad de secado decreciente se observan dos sub-etapas:

1) Primer periodo de velocidad decreciente: sub-etapa de secado con la superficie parcialmente cubierta de agua líquida C-D, periodo que se produce cuando aparecen los primeros sectores de la superficie seca, esta sub-etapa puede ser también bastante corta o prolongarse hasta alrededor del punto de saturación de la fibra.

2) Segundo periodo de velocidad decreciente: Sub-etapa de secado por debajo del punto de saturación de las fibra D-E, este periodo es regido por el movimiento interno de humedad y en las maderas refractarias de difícil secado puede representar prácticamente toda la curva de secado.



**Figura 2.4.** Fase periodo decreciente (C-D), a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad).

## **2.10 Consideraciones adicionales sobre las etapas de secado.**

1. Durante las etapas iniciales del secado, teóricamente se asume que el factor que está controlando el proceso es la remoción de humedad de las capas exteriores de la madera.
2. Durante las últimas etapas del secado, teóricamente el factor que controla el proceso es la difusión de la humedad del interior de la pieza a las superficies externas



3. En etapas intermedias ambos factores, difusión de humedad del interior y exterior y la remoción de humedad de las superficies externas son las que controlan el proceso. Se puede decir que el secado de madera es un balance dinámico entre la transferencia de calor de la corriente de aire a la madera, evaporación de las superficies de la madera, difusión de humedad dentro de la madera y flujo de agua líquida en la madera [4].

## **2.11 Estado del arte de la investigación en secado de madera.**

El secado de madera aun cuando es un proceso productivo que el ser humano realiza desde hace muchos años, no es del todo comprendido debido a que durante el mismo intervienen muchas variables, es por esto que existen una gran cantidad de trabajos que están enfocados a buscar avanzar en la comprensión de este proceso y la importancia de cada variable involucrada. A continuación, se hace una revisión a algunos de los principales trabajos que se han realizado en el área.

### **2.11.1 Modelo bidimensional ortotrópico.**

W. Turner [12], realizó un modelo ortotrópico de dos dimensiones tomando en consideración la dirección del flujo de calor respecto a la muestra de madera (longitudinal y transversal), en tres diferentes escalas de temperatura, a 50 °C, 80°C y 120°C, a una velocidad constante de 2 m/s para todos los casos. Para ello empleo un código de programación denominado *Wood2D*, el cual provee una completa descripción del contenido de la madera, temperatura y la distribución de presión tanto en la dirección longitudinal como en la transversal de la madera, ya que estos parámetros son variables durante el tiempo de secado. Este modelo permite conocer el movimiento del líquido en la dirección más permeable de la madera, la longitudinal al flujo de calor [13].

Para la formulación de este modelo Turner empleó la teoría de difusión simplificada y para el planteamiento matemático para acoplar las dos dimensiones, los modelos de elementos

---



finitos basados en las ecuaciones de Luikov [14, 15]. El modelo resultante es un modelo de tres ecuaciones diferenciales parciales no lineales, resuelto mediante métodos numéricos para estudiar el movimiento transitorio de las variables de contenido de humedad, temperatura y presión.

Los supuestos empleados en la formulación del modelo de Turner son las siguientes:

- Las fases sólidas y de gas son continuas cuando la fase de líquido está por encima del punto de saturación de la fibra (PSF).
- La mezcla binaria de gas de aire y vapor se comporta como un gas ideal.
- La ley de Darcy se mantiene para la fase gaseosa y líquida libre.
- La gravedad está incluida para el gas y las fases líquidas.
- La conducción se produce dentro de cada fase y se puede tratar como constante o puede variar con la temperatura.
- Las energías cinéticas de fase, el fluido viscoso de disipación y el trabajo realizado por las fuerzas de cuerpo son insignificantes.
- Las entalpías para las tres fases son funciones lineales de la temperatura.
- La migración del agua ligada es un proceso de difusión molecular cuyo flujo es proporcional a un gradiente en el potencial químico.
- La presión capilar es una función del contenido de humedad y la temperatura.
- El calor latente de evaporación varía sólo con la temperatura.
- La difusividad se toma como una función de la saturación de líquido, la temperatura y la presión.
- La viscosidad de las fases líquida y de gas depende de la temperatura.
- Las permeabilidades de gas y agua se pueden expresar en términos de permeabilidades relativas.

Turner concluyó que la inclusión de la presión total del gas es un factor esencial en la formulación matemática de los procesos de secado de la madera, en base a sus resultados enfatizó que el comportamiento de la fase gaseosa juega un papel importante en el proceso global para el secado tanto por debajo como por encima del punto de ebullición. Así como los efectos de la anisotropía, en particular para las permeabilidades, influyen sustancialmente en los resultados de secado [13].



El observó que el secado de la madera muestra transferencia de calor y masa bidimensional, con calentamiento en la dirección transversal haciendo que las fases líquida y gaseosa migren en la dirección longitudinal. Esta observación pone de relieve la importancia del modelo de dos dimensiones [12].

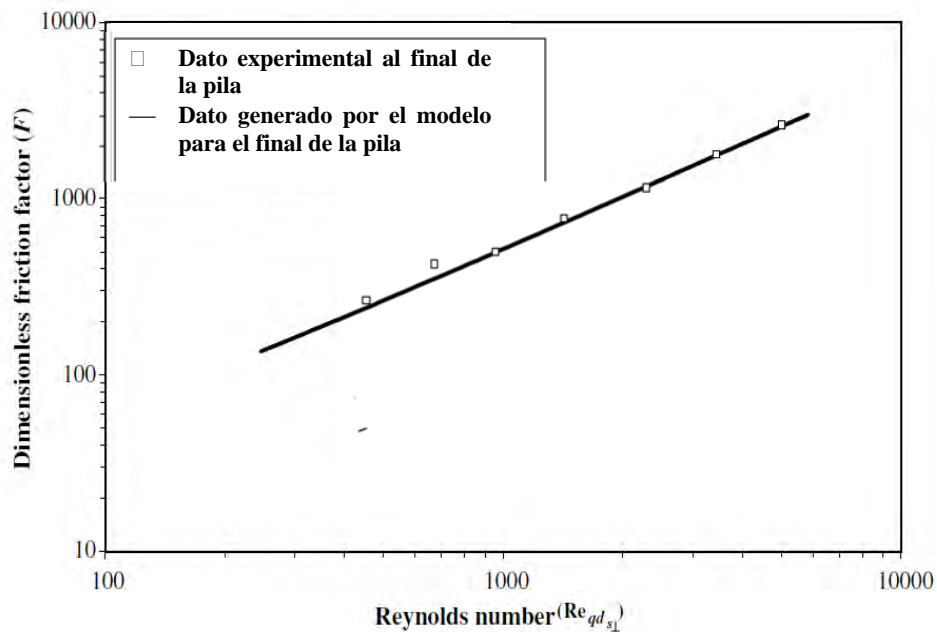
### **2.11.2 Modelo bidimensional: flujo del aire en un arreglo de madera dentro de un horno de secado.**

Otro modelo de dos dimensiones es el propuesto por G.J.F. Smit, J.P. du Plessis y J.P. du Plessis Sr [16, 17, 18], aunque ellos modelaron el flujo del aire a través de una pila de madera en un horno de secado, considerando el flujo entre las pilas y el flujo medio como dos dimensiones. Para ello propusieron una teoría de modelado unificado para la predicción de la caída de presión del flujo cruzado en una estructura prismática. El modelo se deriva promediando volumétricamente las ecuaciones de movimiento sobre un sistema de dos fases de sólidos estacionarios y un fluido de desplazamiento [18].

Dado que en el proceso de secado en hornos uno de los puntos a tomar en consideración es la caída de presión a través de la pila de madera en diferentes configuraciones, ya que éste es el elemento de mayor resistencia en la circulación del aire [19]. Para el modelado del flujo de aire tomaron en cuenta la dirección a través de las pilas de madera, considerando los espacios entre las capas de la junta como un medio poroso isótropo.

Para la creación de su modelo se basaron en los regímenes de flujo de un medio poroso isotrópico a diferencia del modelo basado en el régimen de flujo de Darcy, donde el flujo de volumen es casi inexistente, bajo la teoría del modelo de J. Van der Westhuizen y Du Plessis y Diedericks [16] quien amplió el modelo de Van der Westhuizen y Du Plessis para que sea aplicable a dos dimensiones.

Al realizar sus pruebas experimentales las compararon con las del modelo propuesto, a continuación, se muestra en la figura 2.5.



**Figura 2.5.** Factor de fricción adimensional como una función del número Reynolds. La comparación entre los resultados modelados y los datos experimentales.

Los hornos de secado de madera típicos tienen dos regiones de flujo, una región central, donde el flujo se asemeja al flujo a través de un conducto y la región al final en las que se asemeja a las características del flujo a través de un medio poroso anisotrópico [20].

Este modelo de poros a escala se puede poner en práctica en la industria de secado de madera en la predicción de pérdidas de carga por apilamiento en diferentes arreglos y en el diseño de pilas de gran escala, donde las zonas muertas necesitan ser minimizadas y donde el diseño óptimo es crítico para el funcionamiento económico de la planta.

### **2.11.3 Modelo unidimensional: Técnica de homogenización, para determinar el elemento de volumen representativo, (EVR)**

Uno de los modelos matemáticos realizados en México es el propuesto por Sandoval-Torres Sadoth, Hernández-Bautista Emilio y Rodríguez-Ramírez Juan [21], basado en una simulación multi-física del secado de la madera empleando el software COMSOL Multiphysics 3.4 para la solución de las ecuaciones diferenciales parciales.



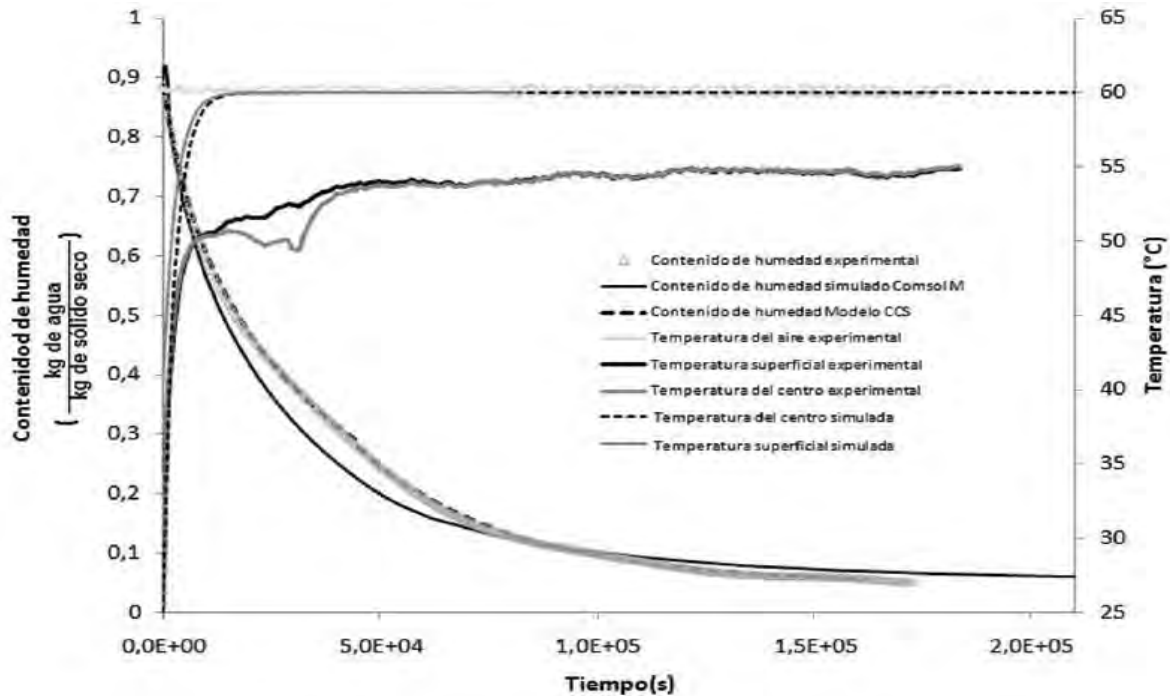
Para ello desarrollaron un modelo matemático unidimensional (eje longitudinal respecto a la muestra) de tipo fenomenológico que describe el secado por convección de aire caliente de la madera *Pinus pseudostrobus*. El desarrollo del modelo parte del balance de masa y calor en el elemento de volumen representativo (EVR), que contiene las fases sólida, líquida, y gaseosa. Para ello se creó un sistema de ecuaciones diferenciales parciales que es resuelto por factorización numérica utilizando COMSOL Multiphysics 3.4. Se resuelven tres variables primarias: contenido de humedad; temperatura y densidad del aire seco.

Para la formulación matemática que representa el proceso de secado por convección de aire caliente se basaron en el modelo de Whitaker [22], y posteriormente de Perré y Turner [23], debido a los arreglos experimentales según la configuración de los poros en la madera, además de la temperatura del aire del túnel debajo del punto de ebullición del agua, se puede suponer que el transporte de humedad se da principalmente en la dirección del espesor de la madera [1].

Para lograr un comparativo al modelo propuesto, ellos realizaron experimentos de secado basados en un diseño uni-factorial con la temperatura como factor a cuatro escalas: 50, 60, 70 y 80 °C, a una velocidad constante (2.5 m/s) y sin controlar la humedad relativa. Estas pruebas las realizaron en un túnel de secado que tiene un control de velocidad y temperatura del flujo del aire sobre la muestra.

Para obtener los resultados en la simulación mediante el modelo propuesto, consideraron la temperatura dentro del túnel a 60°C, con una temperatura inicial de 25°C y el contenido de humedad inicial de la muestra de madera de 96%. Los resultados experimentales y los simulados se muestran en la figura 2.6.





**Figura 2.6.** Variables de contenido de humedad promedio y perfiles de temperatura, simulados y experimentales a temperatura de 60 °C.

Este modelo logra una aproximación muy buena a los datos experimentales, como lo muestran las curvas de secado. A pesar de ser un modelo unidimensional, esto debido que la dimensión de estudio fue la longitudinal, en la cual se generan los mayores movimientos de transferencia de agua [1].

Los modelos antes descritos proveen de una buena aproximación a los valores reales de los parámetros del proceso de secado, sin embargo, aún hay diversas variables a modelar para describir el proceso de secado de la madera. Se espera que la información generada por estos modelos pueda ofrecer un preámbulo para propósitos de análisis de procesos de secado o diseño de nuevos modelos que se aproximen mejor a la realidad.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Siau, J.F. **Procesos de transporte en la madera**, Verlag, New York. 1984. Pp 212-245.
2. Keey, RB., Langrish, T.A.G. y Walker, J.C.F. **Secado de la madera en horno**. Springer, Berlín. (2000). 326p.
3. Stamm, A. J. **Ciencia de la madera y la celulosa**. Ronald Press, Nueva York. 1964, 509 p
4. Echenique Ramón, **Apuntes Curso Interno** Lacitema I.P.N. 1980, pp. 22-25.
5. IAWA. 1964. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy**. Committee on Nomenclatura International Association of Wood Anatomists. 186 p.
6. Strumillo, C. and Kudra, T. **Secado: Principios, Aplicaciones y Diseño**. Gordon y Breach, Ediciones de Ciencia, New York. 1986, 448 p.
7. Langrish, T.A.G. y Walker, J.C. **Procesos de Transporte en la Madera.**: Walker, J.C.F. Chapman y Pasillo, Londres. (1993. Pp. 121-152.
8. Haque, M.N., Langrish, T.A.G., Keep, L-B. and Keey, R.B. **Model Pinus radiata during kiln drying**. Wood Science and fitting for visco-elastic creep Technology, 2000, pp. :447-457.
9. Fengel, D., y G. Wegener. **Química de Madera, Ultraestructura y Reacciones**. Berlín: Walter de Gruyter. 1984, pp. 14-17.
10. Skaar, C. **Relaciones del agua en la madera**. Springer-Verlag, 1988, Berlín
11. Hook, D., C. Brown and R. Wetmore. **Aeration in trees**. Bot. Gaz. 133 (4): 1972. pp. 443-454.
12. Turner, I. W. **The modelling of combined microwave and convective drying of a wet porous material**. Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Engn., University of Queensland. 1991
13. Turner, I. W. and Ilic, M. **Convective drying of a consolidated slab of wet porous material including the sorption region**. Inf. Comm. Hear Mass Transfer, 1990, pp.17, 39-48
14. Morgan, K., Lewis, R. W. and Thomas, H. R. **Numerical modelling of drying induced stresses in porous materials**. Developments in Drying, Science Press, New York, 1979
15. Thomas, H. R., Lewis, R. W. and Morgan, K. **An application of the finite element method**



- to the drying of timber.** Wood Fibre, 11, 1980, pp. 237-243
16. J.P. Du Plessis, G.P.J. Diedericks. **Pore-scale modelling of interstitial transport phenomena: Fluid Transport in Porous Media**, in: J.P. du Plessis (Ed.), Advances in Fluid Mechanics Series, Computational Mechanics Publication, Southampton, Capítulo 2. 1997
  17. J.P. Du Plessis, J.H. Masliyah, **Mathematical modelling of flow through consolidated isotropic porous media**, Transp. Porous Med. 3 (1988), pp.145–161.
  18. G.P.J. Diedericks. **Pore-Scale Modelling of Transport Phenomena in Homogeneous Porous Media**, Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch, South Africa. 1999.
  19. Z. Sun, G. Carrington, **Effect of stack configuration on wood drying processes**, in: Proceedings of the 6th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosch, 1999, pp. 89–98.
  20. J. Van der Westhuizen, J.P. Du Plessis, **Quantification of unidirectional fibre bed permeability**, J. Compos. Mater. 28.1994. 7 p.
  21. Sandoval-Torres S., Hernández-Bautista E., Rodríguez-Ramírez J. **Simulación multi-física del secado de madera en COMSOL Multiphysics 3.4**. Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 3) 2013, pp. 389-398.
  22. Whitaker S. **Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying**. Advances in Heat Transfer, volume 13, (número 1) 1977: 119-203
  23. Perré P. y Turner I. **A Dual Scale Model for Describing Drier and Porous Medium Interactions**. AIChE Journal, volumen 52 (número 9), 2006, pp. 3109-3117.



## CAPÍTULO 3

### PRUEBAS DE SECADO

En este capítulo se presenta los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a muestras de madera, específicamente se estudió la variación del contenido de humedad según la dirección del flujo del medio secante respecto a la dirección de las fibras, longitudinal (paralelo) y transversal (perpendicular).

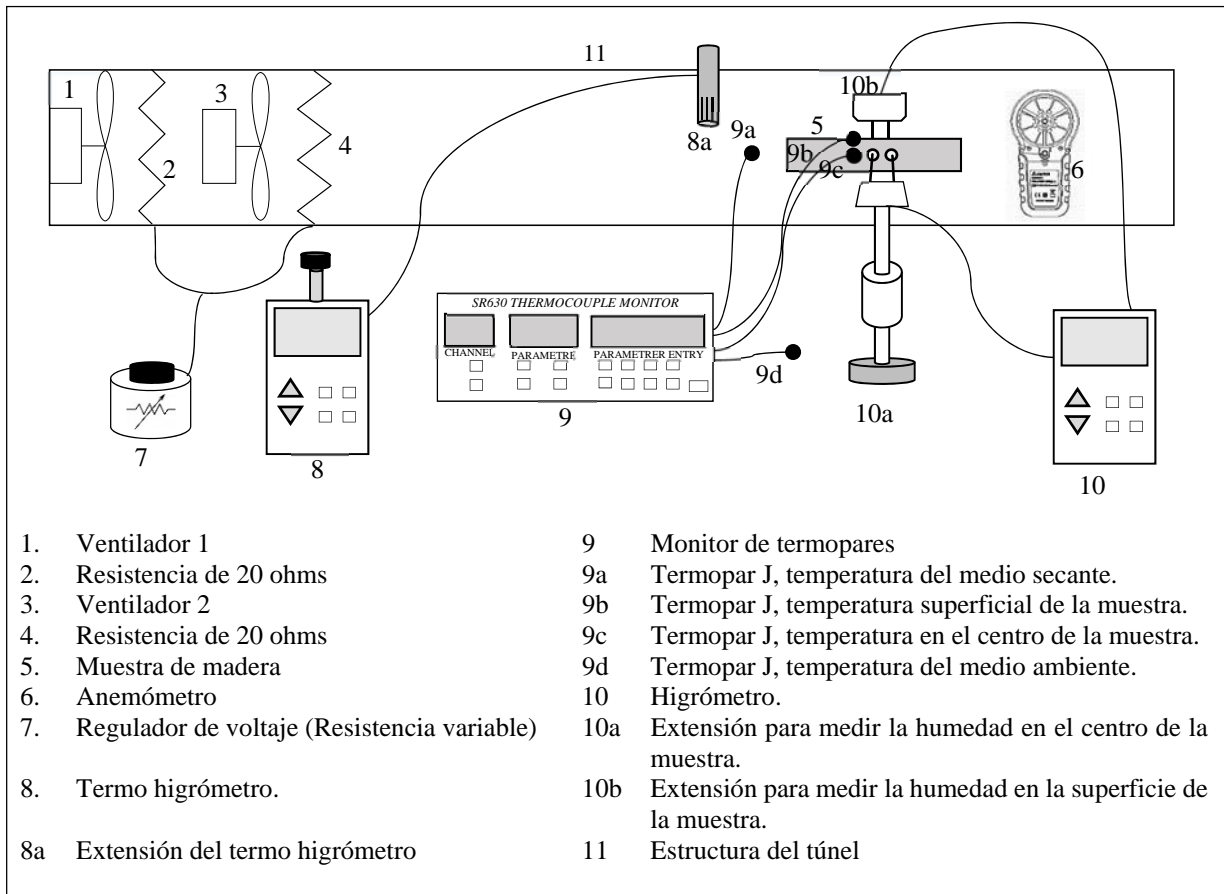
#### 3.1 Desarrollo experimental.

Con el objetivo de comparar los contenidos de humedad en los flujos paralelo y perpendicular respecto a una muestra de madera, se realizaron experimentos de secado a diferentes temperaturas: 50 y 60, °C, y a dos velocidades del aire: 1.8 y 2.6 m/s, sin controlar la humedad relativa. La selección de las temperaturas fue acorde a los rangos en los cuales se operan los secadores solares, así como las velocidades de flujo secante, las cuales son menores a 2.5 m/s, sin embargo, la limitante de la velocidad de 1.8 m/s es sugerido por el uso de un solo ventilador. Se utilizó un túnel de secado del laboratorio de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo, que está diseñado para hacer pasar por la muestra de madera un flujo de aire con velocidad y temperatura uniforme.

El aire se calienta mediante dos resistencias eléctricas de 20 ohms, controladas por medio de un potenciómetro cuyo ajuste es manual. La velocidad del flujo del aire es generada por dos ventiladores, (velocidad de 2.6 m/s con 2 ventiladores y velocidad de 1.8 m/s con un ventilador). La medición de la temperatura se da a través de termopares tipo J, conectados simultáneamente y aislados eléctricamente para reducir el error del sistema, todos ellos conectados a un monitor de termopares. El peso de la muestra es registrado al inicio de la prueba y al final de la misma en una balanza de precisión con un margen de error de  $\pm 0.1$  gramos. La captura de datos es en forma manual, registrando los valores de temperatura y humedad (en la muestra y del ambiente),

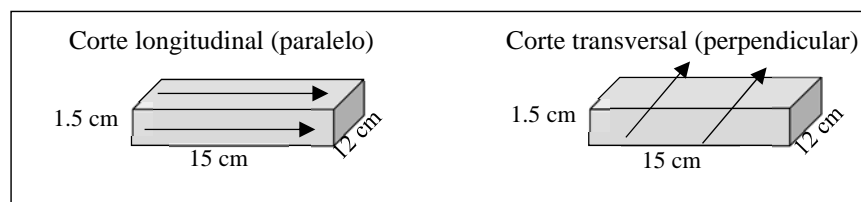
---

cada 20 minutos. La figura 3.1 muestra el diagrama de disposición de la muestra respecto al túnel y la ubicación de los dispositivos de medición y control.



**Figura 3.1** Diagrama de disposición de la muestra en el túnel de secado y de la conexión de los instrumentos de medición y control.

Las muestras de madera fresca se obtuvieron al azar del aserradero “El Trébol” ubicado en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Las dimensiones de las muestras fueron de 15 cm de largo, 12 cm de ancho con un espesor de 1.5 cm. Para observar la variación del contenido de humedad en el proceso de secado respecto a la orientación de las fibras, las muestras fueron cortadas según la orientación de las mismas, como se muestra en la figura 3.2.



**Figura 3.2** Corte de las muestras de madera según la orientación de sus fibras.



Las tablas frescas de madera fueron sumergidas completamente en agua durante 24 horas, posteriormente cubiertas con plástico impermeable (bolsa ziploc). Los bordes fueron sellados con silicón y encintados con el objetivo de que el transporte de humedad ocurra sólo en la dirección del espesor de la madera. Cada muestra fue perforada en los extremos del espesor para la introducción de termopares en el centro y a 1 milímetro de la superficie. Los experimentos tuvieron una duración promedio de 8 horas cada uno; el monitoreo y registro de los datos de las variables de temperatura, contenido de humedad y velocidad de flujo es de cada 20 minutos.

A continuación, se presenta una tabla con el número de prueba y sus correspondientes variables controladas para su efecto de estudio (temperatura, orientación de la muestra respecto al flujo de secado y velocidad del aire).

**Tabla 3.1.** Listado del número de pruebas realizadas.

Nº de prueba	Temperatura °C	Tipo de flujo	Velocidad del aire (m/s)	Duración de la prueba (min.)
1	50	Perpendicular	1.8	480
2	50	Perpendicular	2.6	480
3	60	Perpendicular	1.8	480
4	60	Perpendicular	2.6	480
5	50	Paralelo	1.8	480
6	50	Paralelo	2.6	480
7	60	Paralelo	1.8	480
8	60	Paralelo	2.6	480

Para realizar el análisis comparativo se tomó como referencia la orientación de las fibras de la muestra respecto al flujo (flujo paralelo vs flujo perpendicular), quedando 4 comparaciones entre las pruebas, las cuales tienen la misma temperatura y velocidad, tabla 3.2.

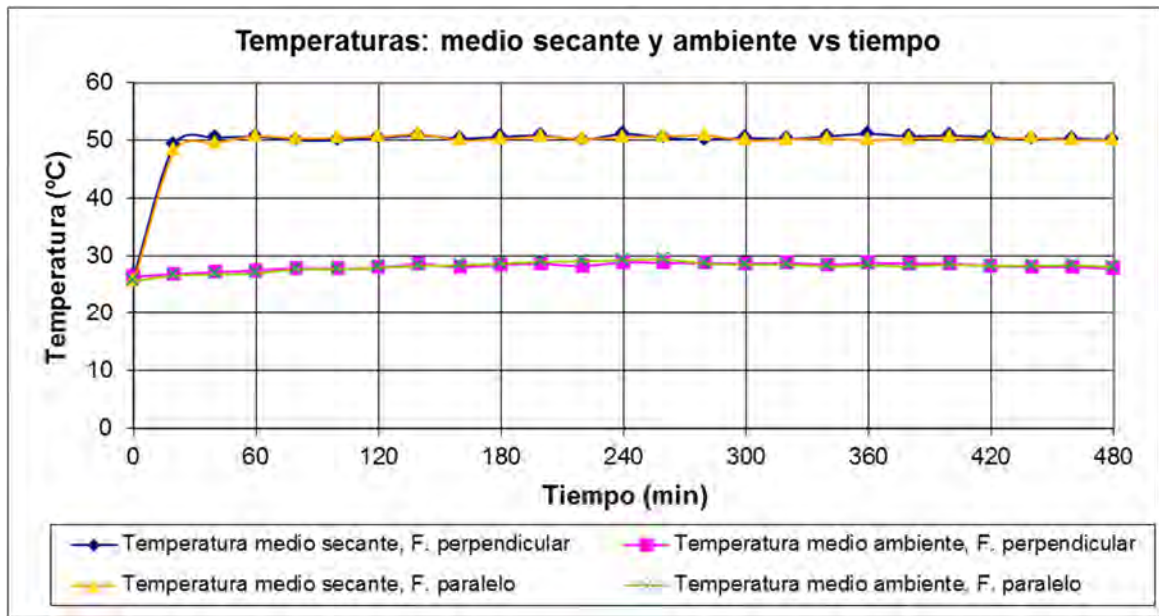
**Tabla 3.2.** Nº de comparativos de las pruebas experimentales.

Nº de comparación	Nº de pruebas	Velocidad del aire (m/s)	Temperatura °C
1	1 y 5	1.8	50
2	2 y 6	2.6	50
3	3 y 7	1.8	60
4	4 y 8	2.6	60

### 3.2 Comparativo 1

➤ **Condiciones de prueba de secado a 50° C, velocidad 1.8 m/s**

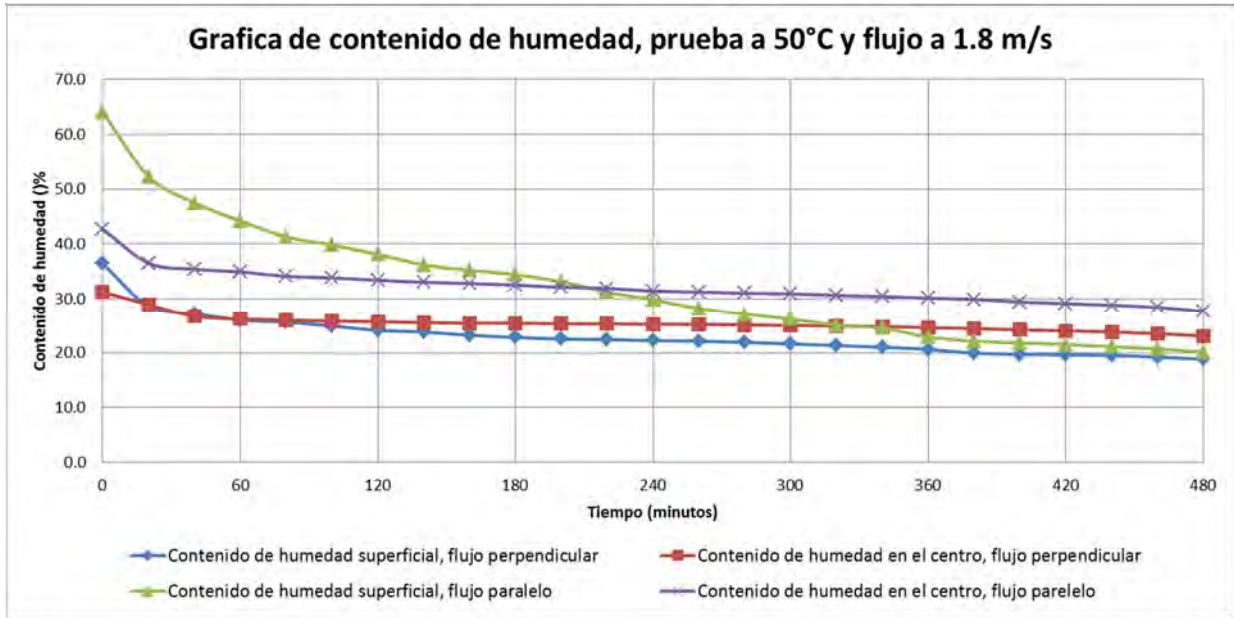
Para esta comparación, los resultados de las pruebas se muestran en las gráficas, teniendo en el eje ordinal a la variable de temperatura y en el eje de las abscisas a la variable del tiempo.



**Figura 3.3** Condiciones de temperatura registradas durante la prueba 1 (flujo paralelo) y la prueba 5 (flujo perpendicular), a temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.

En la figura 3.3, se puede observar las condiciones de temperatura del ambiente durante las pruebas de flujo paralelo y de flujo perpendicular; se constata que la temperatura del medio secante es uniforme durante todo el proceso de la prueba, lo que garantiza la fiabilidad de los resultados obtenidos para la variable de estudio, el contenido de humedad.

### 3.2.1 Resultados del comparativo 1



**Figura 3.4.** Contenido de humedad superficial y en el centro, registrado durante la prueba de flujo perpendicular y paralelo, a una temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.

En la figura 3.4, se puede observar la variación del contenido de humedad en las muestras durante su proceso de secado. El contenido de humedad en la superficie disminuyó más rápido que en el contenido de humedad en el centro. Aunque en la primera hora durante el proceso de secado, esta diferencia era insignificante en la prueba de flujo perpendicular, esto debido a la saturación de humedad inicial que tenía la muestra, sin embargo, durante la evaporación continua de la humedad en la superficie, ésta se secó y dio inicio al fenómeno de transporte de humedad por fibras (capilaridad), un proceso de transporte de humedad que va del centro a las superficies (de mayor a menor humedad). El cual no es lo suficiente rápido para mantener el contenido de humedad en las superficies, debido a que éstas estaban sometidos al proceso de evaporación [1], el cual es un fenómeno de transferencia de masa más acelerado, por lo que la superficie mantuvo una tendencia de disminución de contenido de humedad mayor que en el centro de la muestra.

Los datos iniciales corroboran lo explicado, la muestra inicia con un contenido de humedad del 34.5 % en la superficie y 34.2% en el centro, lo que indica que inició con un equilibrio de contenido de humedad en la superficie con respecto al centro. Al final de la prueba





el contenido de humedad en la superficie fue de 19.8% y de 23.5% en el centro, una diferencia del 3.7%, lo que indica una mayor pérdida de contenido de humedad en la superficie.

En la figura 3.4 se puede constatar una diferencia muy grande en los contenidos de humedad inicial, cerca de un 30 %. Esto debido a que las fibras de la superficie están más cerca del flujo secante por lo que su pérdida de agua es mucho más rápida que la del centro de la muestra.

En la curva correspondiente al contenido de humedad en la superficie se puede apreciar un decrecimiento muy pronunciado en comparación con la curva correspondiente al contenido de humedad en el centro. Esto movimiento abrupto de contenido de humedad en la superficie, provoca una contracción de las fibras de la madera, como consecuencia se presentan grietas en la superficie de la muestra, aproximadamente después de 3 horas de estar sometida en el medio secante. Cabe mencionar que este fenómeno no se presentó en la prueba 1 (flujo perpendicular), por lo que la disminución del contenido de humedad en la superficie se da con mayor rapidez cuando la orientación de las fibras es longitudinal al flujo del medio secante.

**Tabla 3.3** Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 1 (flujo perpendicular) y la prueba 5 (flujo paralelo), a una temperatura de 50 °C y a velocidad de flujo de aire de 1.8 m/s.

Tipo de flujo	Contenido de humedad superficial			Contenido de humedad en el centro		
	Porcentaje (%)			Porcentaje (%)		
	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
Perpendicular	36.4	31.2	<b>5.2</b>	31.2	23.1	<b>8.1</b>
Paralelo	64	20.1	<b>43.9</b>	42.7	27.7	<b>15</b>

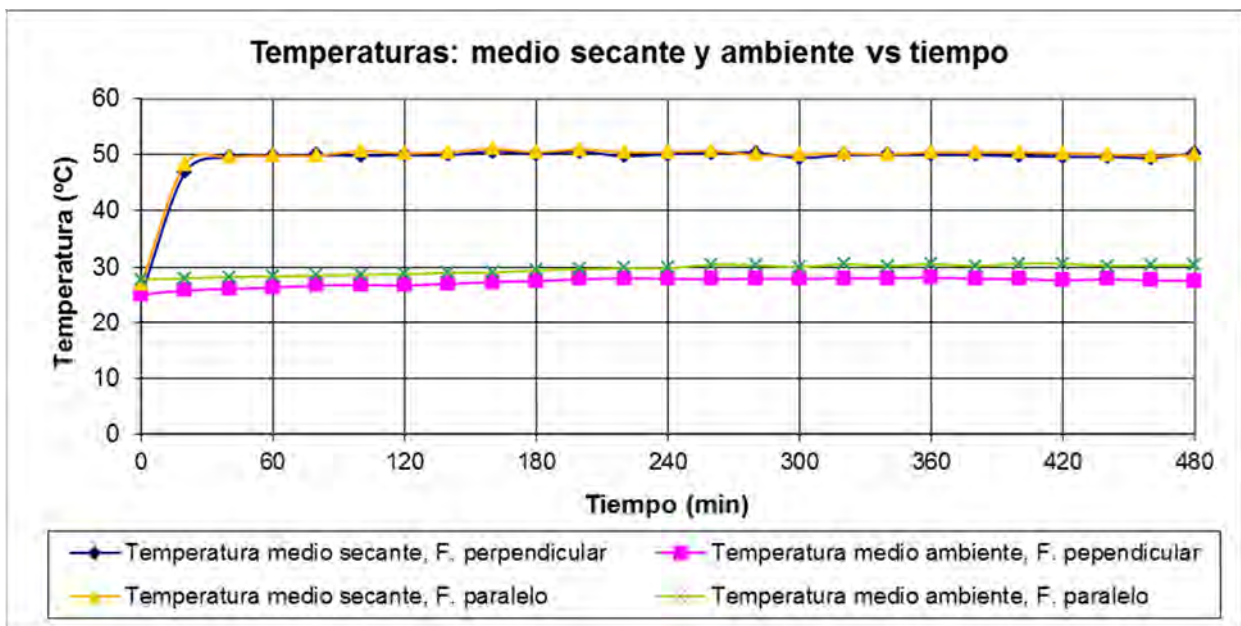
La tabla anterior nos muestra las diferencias entre el contenido de humedad inicial y final, para los flujos perpendicular y paralelo, siendo el paralelo en donde hay más pérdida de contenido de humedad. La superficie de la muestra en el flujo paralelo pierde significativamente su contenido de humedad, sin embargo, no presenta encogimiento o deformación.

Aunque el comportamiento de la curva del contenido de humedad superficial de la prueba 5 (flujo paralelo) es muy divergente con respecto a la curva de contenido de humedad

superficial de la prueba 1 (flujo perpendicular), las curvas de los contenidos de humedad en el centro de ambas pruebas son muy parecidas. En la prueba 1 el contenido de humedad inicial en el centro fue de 36.4% y el contenido de humedad final en el centro fue de 31.2%, lo que indica que la pérdida de contenido de humedad fue de 5.2%. Para el caso de la prueba 5, el contenido de humedad inicial en el centro fue de 31.2% y el contenido de humedad final en el centro fue de 23.1%, por lo que la pérdida de contenido de humedad fue del 8.1%. Lo que indica que el proceso durante el secado en orientación de las fibras sólo se pierde humedad exponencialmente en la superficie, sin embargo, el contenido de humedad en el centro va disminuyendo de una forma lineal.

### 3.3 Comparativo 2

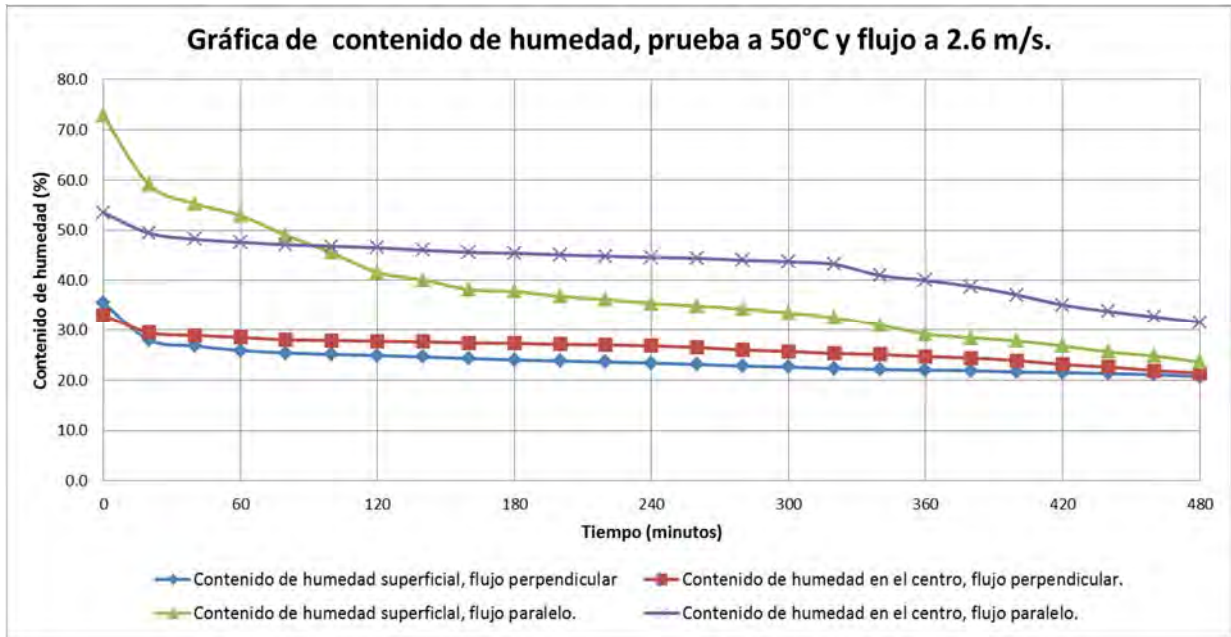
- Condiciones de prueba de secado a 50° C, velocidad 2.6 m/s



**Figura 3.5** Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 2 (flujo perpendicular) y 6 (flujo paralelo).

Para esta prueba, la temperatura de 50°C en el medio secante también se mantuvo uniforme, como se muestra en la figura 3.5. Lo cual nos garantiza una fiabilidad en la obtención de nuestros resultados, especialmente de la variable de interés, el contenido de humedad.

### 3.3.1 Resultados del comparativo 2



**Figura 3.6** Contenido de humedad en la muestra registrado, en el centro y en la superficie de la muestra, flujo perpendicular y paralelo, a una temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 2.6 m/s.

La característica de la pérdida de humedad homogénea en el flujo perpendicular es de importancia dado que esta característica permite mantener un contenido de humedad en equilibrio en el centro y en la superficie de muestra de madera, lo que evitaría las contracciones de las fibras y capilares que ocasionan las características no deseadas, como las deformaciones, grietas y encogimientos.

Cuando el flujo del medio secante es paralelo a las fibras de la madera la pérdida de humedad es mayor [1], en la comparativa de la figura 3.6 se observa el gradiente del contenido inicial y final, tanto de la superficie como en el centro de la muestra. La pérdida de humedad en la superficie es del 49%, y la del centro 21.2%. La curva de contenido de humedad en la superficie sigue la tendencia logarítmica, perdiendo la mayor cantidad de agua en las primeras 4 horas (240 minutos), después de este lapso de tiempo la curva se comportó muy similar a la del contenido de humedad en el centro.



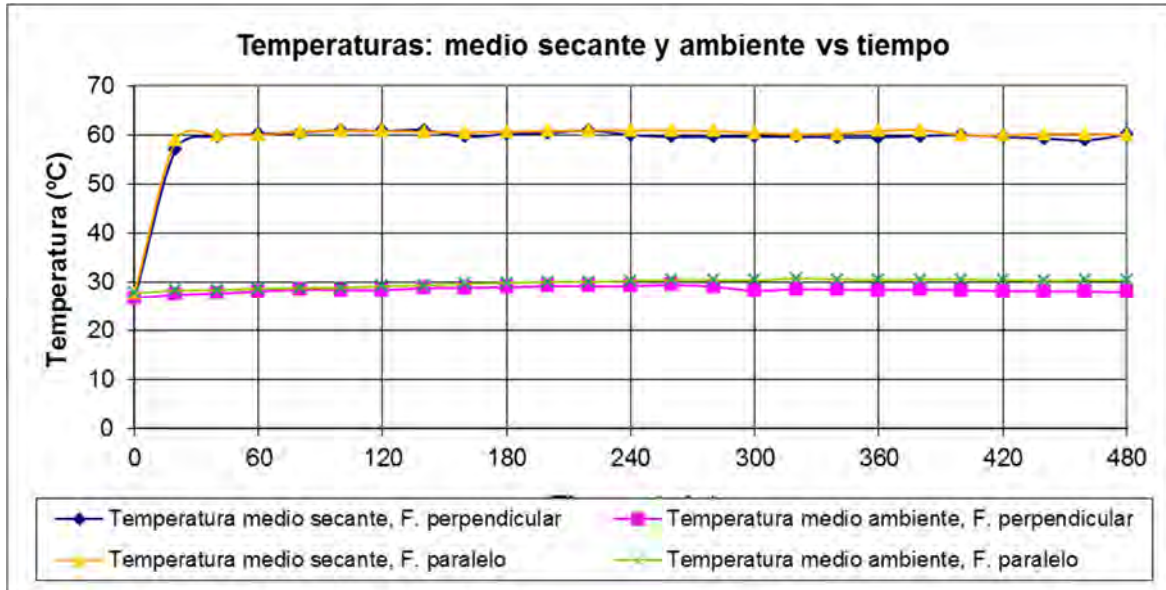
Esta diferencia de contenido de humedad en la superficie y en el centro, provoca que, a partir de las 3 horas, se formen pequeñas grietas en la superficie de la muestra de madera, al final de la prueba no se observaron deformaciones ni encogimiento. Sin embargo, la reducción del contenido de humedad fue mucho mayor en comparación con del flujo perpendicular, como se muestra en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4** Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 2 (flujo perpendicular) y la prueba 6 (flujo paralelo), a una temperatura de 50 °C y a velocidad de flujo de aire de 2.6 m/s.

Tipo de flujo	Contenido de humedad superficial			Contenido de humedad en el centro		
	Porcentaje (%)			Porcentaje (%)		
	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
Perpendicular	36.4	18.8	<b>17.6</b>	33	21.4	<b>11.6</b>
Paralelo	72.8	23.6	<b>49.2</b>	53.5	31.6	<b>16.5</b>

### 3.4 Comparativo 3

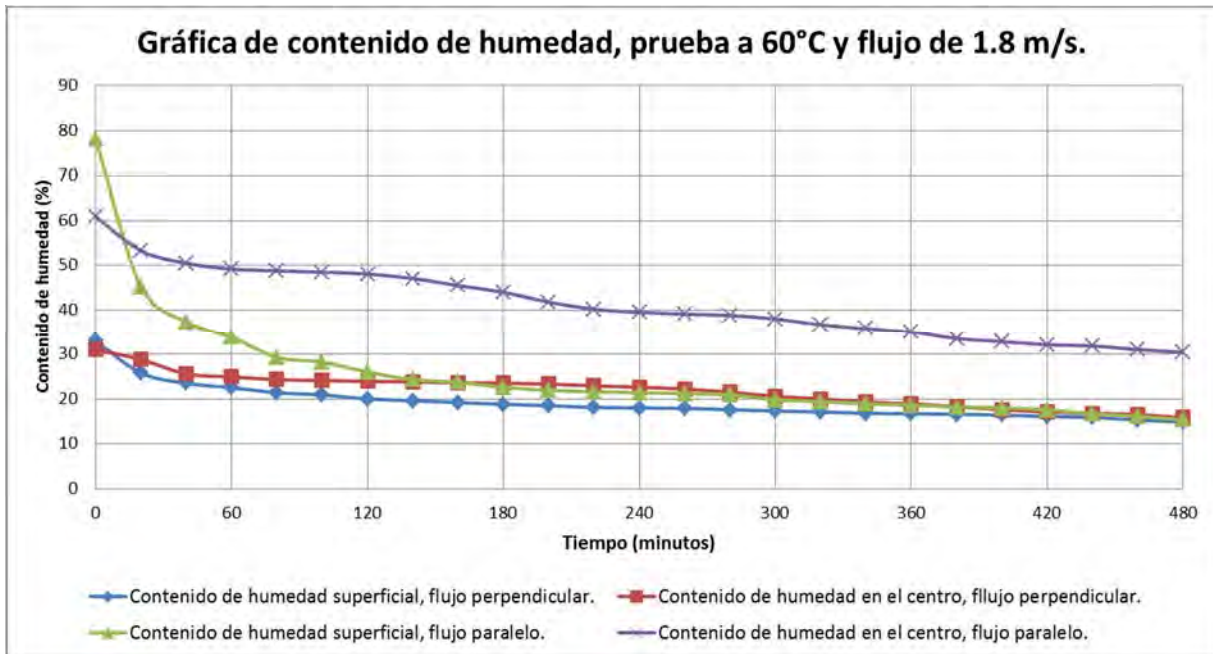
- Condiciones de prueba de secado a 60° C, velocidad del flujo de aire 1.8 m/s



**Figura 3.7** Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 3 (flujo perpendicular) y 7 (flujo paralelo).

También en esta prueba hay poca variabilidad en la temperatura del medio secante, siendo uniforme en casi todo el proceso experimental. Dando confiabilidad a los resultados obtenidos, que a continuación se menciona.

### 3.4.1 Resultados del comparativo 3



**Figura 3.8** Contenido de humedad en la muestra registrado en el centro y en la superficie de la muestra, flujo paralelo y perpendicular, a una temperatura de 60°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.

La pérdida de humedad se da una mayor velocidad en la superficie de la muestra, observándose la curva pronunciada del contenido de humedad superficial en el flujo paralelo, esta diferencia de humedad provoca pequeñas grietas de 1.2 cm a las 2 horas (124 minutos) de haber iniciado el proceso de secado, sin embargo, al culminar la prueba no hubo deformación ni encogimiento.

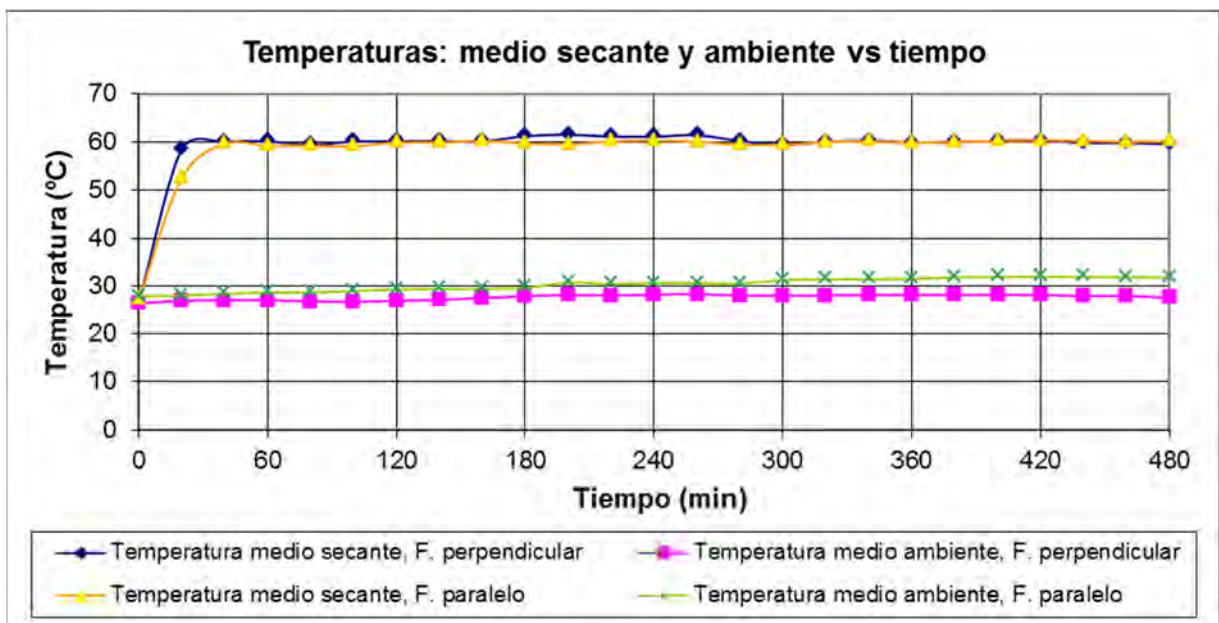
**Tabla 3.5** Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 3 (flujo perpendicular) y la prueba 7 (flujo paralelo), a una temperatura de 60 °C y a velocidad de flujo de aire de 1.8 m/s.

Tipo de flujo	Contenido de humedad superficial			Contenido de humedad en el centro		
	Porcentaje (%)			Porcentaje (%)		
	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
Perpendicular	33	14.9	<b>18.1</b>	30.3	19.7	<b>10.6</b>
Paralelo	78.2	15.4	<b>62.8</b>	60.9	30.4	<b>30.5</b>

La variación de la pérdida de humedad se va incrementado y notablemente más en el flujo paralelo, quedando demostrado los estudios de Siau [1], sin embargo la pérdida rápida de humedad no es garantía de un proceso de secado exitoso, ya que al incrementar el gradiente de contenido de humedad en el centro respecto a la superficie, se tiende a generarse más defectos no deseados en la madera, como en esta prueba en el que la longitud de las grietas (1.6 cm) se fue incrementando, respecto a las pruebas anteriores.

### 3.5 Comparativo 4

- Condiciones de prueba de secado a 60° C y flujo de aire a 2.6 m/s.

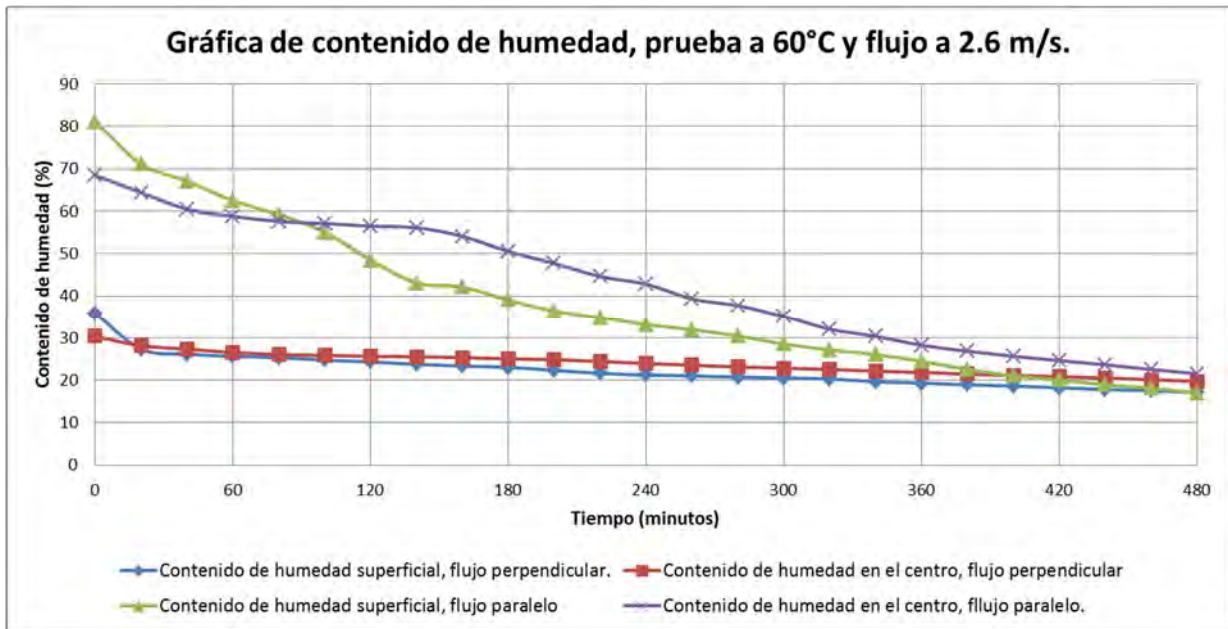


**Figura 3.9**, Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 4 (flujo perpendicular) y la prueba 8 (flujo paralelo).

Las condiciones térmicas del ambiente y del medio secante se mantuvieron estables durante el proceso experimental de las pruebas 4 (flujo perpendicular) y la prueba 8 (flujo paralelo).



### 3.5.1 Resultados del comparativo 4.



**Figura 3.10** Contenido de humedad en la muestra registrado en el centro y en la superficie de la muestra, flujo paralelo y perpendicular, a una temperatura de 60°C y velocidad de flujo de aire a 2.6 m/s.

En la prueba de 60 °C y con la velocidad de flujo de aire a 2.6 m/s, uno esperaría un gradiente de pérdida de humedad mucho mayor a la prueba con un menor flujo de aire, sin embargo ésta se mantuvo muy uniforme y casi lineal en el caso para el flujo perpendicular y para el flujo paralelo el contenido de humedad en la superficie se comportó muy parecido al del centro de la muestra, incluso llegando al contenido de humedad en equilibrio, pues al término de la prueba el contenido de humedad en el centro y en la superficie tenían una variación del 4.5%.

Sin embargo, a pesar de no haber gradientes muy grandes de pérdida de humedad, aparecieron grietas en la superficie de la muestra, la mayor de 1.8 cm de longitud, las demás muy pequeñas y poco notorias, esto conlleva a plantear que las pérdidas de humedad de forma rápida y continua, generan contracciones en los capilares, dada la pérdida de agua, generando movimientos mecánicos en la madera, que se ven reflejados en las grietas y leve deformación de la muestra de estudio.





**Tabla 3.6** Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 4 (flujo perpendicular) y la prueba 8 (flujo paralelo), a una temperatura de 60 °C y a velocidad de flujo de aire de 2.6 m/s.

Tipo de flujo	Contenido de humedad superficial			Contenido de humedad en el centro		
	Porcentaje (%)			Porcentaje (%)		
	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
Perpendicular	35.8	17.1	<b>18.7</b>	31	15.8	<b>15.2</b>
Paralelo	81.1	17	<b>64.1</b>	68.5	21.5	<b>47</b>

En la tabla 3.6 se observa que la pérdida de humedad en la superficie en la prueba de flujo paralelo es mayor, más que en todas las pruebas anteriores, con esto se demuestra que la velocidad del flujo de aire si influye en la pérdida de humedad, pero conlleva a que se generen daños no deseados en la madera, sin embargo, para minimizar estos defectos es recomendable tener una relación eficiente entre la temperatura en un secador de madera y la velocidad de flujo [2].

Sin embargo, la orientación del flujo del medio secante respecto a las fibras de la madera es de considerarse ya que se obtienen contenidos de humedad muy buenos al término del tiempo de secado teniendo un secado más uniforme y sin menos daños en la madera, en un flujo perpendicular.



### **3.6 Compendio de resultados**

A continuación, se muestra en la tabla 3.7 los resultados finales de las pruebas realizadas, cabe hacer mención que las pruebas impares (1, 3, 5 y 7) son a velocidad de 1.8 m/s y las pruebas pares (2, 4, 6 y 8) son a velocidad de 2.6 m/s

**Tabla 3.7.** Compendio de los resultados obtenidos en las pruebas de secado de la madera de pino.

N° de prueba	Orientación de la muestra	Temperatura °C	Contenido de humedad en la superficie			Contenido de humedad en el centro		
			Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
1	Perpendicular	50	36.4	31.2	<b>5.2</b>	31.2	23.1	<b>8.1</b>
2	Perpendicular	50	36.4	18.8	<b>17.6</b>	33	21.4	<b>11.6</b>
3	Perpendicular	60	33	14.9	<b>18.1</b>	30.3	19.7	<b>10.6</b>
4	Perpendicular	60	35.8	17.1	<b>18.7</b>	31	15.8	<b>15.2</b>
5	Paralelo	50	64	20.1	<b>43.9</b>	42.7	27.7	<b>15</b>
6	Paralelo	50	72.8	23.6	<b>49.2</b>	53.5	31.6	<b>16.5</b>
7	Paralelo	60	78.2	15.4	<b>62.8</b>	60.9	30.4	<b>30.5</b>
8	Paralelo	60	81.1	17	<b>64.1</b>	68.5	21.5	<b>47</b>

En esta tabla se muestran los datos más representativos de las pruebas realizadas en el secado de la madera de pino, se observan los contenidos de humedad superficial y en el centro de las muestras, a diferentes configuraciones de velocidad de flujo secante y temperatura.

Los comparativos anteriores se realizaron con los parámetros en común de velocidad de flujo y temperatura, teniendo la orientación de las fibras de la madera como variable de estudio. En este concentrando general se puede observar la variación de los contenidos de humedad a diferentes temperaturas; siendo las pruebas 4 y 8 las de mayor pérdida según su orientación (la prueba 4, flujo perpendicular y la prueba 8 flujo paralelo).

La pérdida de contenido de contenido de humedad es proporcional al incremento de la temperatura y la velocidad del flujo secante, sin embargo, las velocidades de flujo secante de 2.6 m/s provocan daños en la madera como grietas pequeñas (1.2 cm a 1.8 cm.), siendo la



configuración de flujo paralelo y temperatura de 60°C, donde más grietas se presentaron en la muestra, sin embargo, no presentó deformaciones.

A diferencia de las pruebas de flujo paralelo, las de flujo perpendicular, no presentaron grietas ni deformaciones, esto debido a que el equilibrio de contenido de humedad entre el centro y en la superficie se mantuvo estable, sin una variación abrupta o mayor del 20%, lo que permite minimizar los daños propios del secado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. Siau, J.F. **Procesos de transporte en la madera**, Verlag, New York. 1984. Pp 212-245.
2. Keey, RB., Langrish, T.AG. y Walker, J.C.F. **Secado de la madera en horno**. Springer, Berlín. (2000). 326p.



## CAPÍTULO 4

### CONCLUSIONES

En el estudio comparativo de las pérdidas de contenido de humedad en la orientación paralela y perpendicular a las fibras de la madera, se pudieron observar dos puntos de mayor relevancia durante el proceso de secado.

**Primero: La temperatura como factor de un secado uniforme.**

Durante las pruebas realizadas se observó que, a menor temperatura, la pérdida de humedad es uniforme, (**figura 3.4 y 3.6**) donde los perfiles de contenido de humedad se comportan de una forma semi-lineal. Sin embargo, su importancia radica en el hecho de la minimización de los defectos que sufre la madera al pasar por el proceso de secado, dado que ninguna de las muestras sometidas a las pruebas experimentales de 50°C presentaron grietas, deformaciones o encogimiento, a su vez que optimiza el consumo energético. Pero los tiempos de secado se ven prolongados y este es un factor relevante en el ámbito comercial, aunque este punto no es de importancia en nuestro comparativo.

**Segundo: La orientación de las fibras de la madera, respecto al flujo secante como factor para un secado uniforme.**

En todas las gráficas generadas por las pruebas experimentales, el arreglo perpendicular al flujo secante fue el más uniforme y lineal (**gráficas 3.4, 3.6, 3.8 y 3.10**), permitiendo hasta cierto punto el equilibrio entre el contenido de humedad en el centro de la muestra y la superficie de la misma, esto facilita una transferencia de agua más estable dentro de la madera, evitando los gradientes bruscos de pérdida de humedad y por consiguiente se logra un secado uniforme, a pesar del incremento de la velocidad del flujo o de la temperatura. Este es un factor de gran



importancia al momento de realizar los arreglos de madera dentro de un horno o túnel de secado, no sólo para lograr la eficiencia energética, sino para lograr un producto con el menor daño posible y con el contenido de humedad adecuado para su uso final.

Este comparativo de los contenidos de humedad de la madera durante el proceso de secado a bajas temperaturas, es un precedente más para estudios posteriores sobre este tema tan vasto, la teoría del secado.



## LITERATURA CITADA

- Desch, RE. y Dinwoodie, J.M. **Madera: Estructura, Propiedades, Conversión y Uso.** Macmillan Press Ltd., Londres. 1996 306 p.
- Echenique Ramón, **Apuntes Curso Interno** Lacitema I.P.N. 1980, pp. 22-25.
- Fengel, D., y G. Wegener. **Química de Madera, Ultraestructura y Reacciones.** Berlín: Walter de Gruyter. 1984, pp. 14-17.
- G.P.J. Diedericks. **Pore-Scale Modelling of Transport Phenomena in Homogeneous Porous Media**, Ph.D. Thesis, University of Stellenbosch, South Africa. 1999.
- Gong, L. **Estudio numérico-experimental teórico de la transferencia de calor y masa en la madera durante el secado.** Tesis de Doctor, Universidad de Estado de Washington, departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, 1992, pp. 18-21. Estados Unidos.
- Haque, M.N., Langrish, T.A.G., Keep, L-B. and Keey, R.B. **Model Pinus radiata during kiln drying.** Wood Science and fitting for visco-elastic creep Technology, 2000, pp. :447-457.
- Haygreen, J.G. and J.L. Bowyer, **Productos Forestales y Ciencia de la Madera, una introducción.** 3ª edición, Prensa de Universidad de Estado de Iowa / Ames. 199 p.
- Hoadley, B.R. **Identificación de la madera, unos resultados exactos con instrumentos simples.** Prensa de Taunton, Newtown, 1980. Connecticut 06470-5506
- Hook, D., C. Brown and R. Wetmore. **Aeration in trees.** Bot. Gaz. 133 (4): 1972. pp. 443-454.
- IAWA. 1964. **Multilingual glossary of terms used in wood anatomy.** Committee on Nomenclatura International Association of Wood Anatomists. 186 p.
- J. Van der Westhuizen, J.P. **Du Plessis, Quantification of unidirectional fibre bed permeability,** J. Compos. Mater. 28.1994. 7 p.
- J.P. Du Plessis, G.P.J. Diedericks. **Pore-scale modelling of interstitial transport phenomena: Fluid Transport in Porous Media,** in: J.P. du Plessis (Ed.), Advances in Fluid Mechanics Series, Computational Mechanics Publication, Southampton, Capítulo 2. 1997
- J.P. Du Plessis, J.H. Masliyah, **Mathematical modelling of flow through consolidated isotropic porous media,** Transp. Porous Med. 3 (1988), pp.145–161.



- 
- Keey, RB., Langrish, T.AG. y Walker, J.C.F. **Secado de la madera en horno**. Springer, Berlín. (2000). 326p
  - Langrish, T.AG. y Walker, J.C. **Procesos de Transporte en la Madera.**: Walker, J.C.F. Chapman y Pasillo, Londres. 1993. Pp.. 121-152.
  - MacLean, J.D. **Conductividad térmica de la madera**. Calefacción, Tubería y Aire Acondicionado. Vol 13, 1941. pp. 380-391.
  - Morgan, K., Lewis, R. W. and Thomas, H. R. **Numerical modelling of drying induced stresses in porous materials**. Developments in Drying, Science Press, New York, 1979
  - Panshin, A.J. de Zeeuw, C. **Libro de texto, Tecnología de la Madera**. Volumen 1, Tercera Edición. McGraw-Hill, Nueva York, 1970. 705 p.
  - Perré P. y Turner I. **A Dual Scale Model for Describing Drier and Porous Medium Interactions**. AIChE Journal, volumen 52 (número 9), 2006, pp. 3109-3117.
  - Rowell, R. **The Chemistry of Solid Wood**. Advances in Chemistry 207. American Chemical Society, Washington, DC. 1984.
  - Rowley, F.B. **La conductividad de calor en la madera a diferentes temperaturas climáticas**. Calefacción, Tubería, y Aire Acondicionado. Volumen 5:313-323. 1933.
  - Sandoval-Torres S., Hernández-Bautista E., Rodríguez-Ramírez J. **Simulación multi-física del secado de madera en COMSOL Multiphysics 3.4**. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIV (número 3) 2013, pp. 389-398.
  - Siau, J.F. **Procesos de transporte en la madera**, Verlag, NewYork. 1984. Pp 212-245.
  - Siau, J.F. **Madera: Influencia de la humedad en las propiedades físicas**. Departamento de Ciencia de la Madera y Productos Forestales, Virginia Tech. 1995. pp. 2-7, 20-26.
  - Simpson, William T., ed. **Dry Kiln Operator's Manual**. Agric. Handbook AH-188. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1991.
  - Skaar, C. **Relaciones del agua en la madera**. Springer-Verlag, 1988, Berlín
  - Stamm, A. J. **Ciencia de la madera y la celulosa**. Ronald Press, Nueva York. 1964, 509 p
  - Strumillo, C. and Kudra, T. **Secado: Principios, Aplicaciones y Diseño**. Gordon y Breach, Ediciones de Ciencia, New York. 1986, 448 p.
  - Thomas, H. R., Lewis, R. W. and Morgan, K. **An application of the finite element method to the drying of timber**. Wood Fibre, 11, 1980, pp. 237-243
-





- Turner, I. W. and Ilic, M. **Convective drying of a consolidated slab of wet porous material including the sorption region.** Inf. Comm. Heat Mass Transfer, 1990, pp.39-48
- Turner, I. W. **The modelling of combined microwave and convective drying of a wet porous material.** Ph.D. Thesis, Dept. Mech. Engn., University of Queensland. 1991
- Urakami, H. y M. Kuyuyama. **La influencia de la gravedad específica en conductividad térmica de madera.** Universidad de Kyoto.. Volumen 25: 1981, pp.38-45
- Van Dusen, M.S. **La conductividad térmica de los aislantes del calor.** J. Am. Soc. Heat. Vent. Eng. 1920. Vol.26:625-656.
- Wangaard, F.F. 1969. **Trasmisividad del calor en la madera de pino amarillo del sur, conglomerada y contraparchado,** Ciencia de la Madera. Vol.2 (1):54-60.
- Whitaker S. **Simultaneous Heat, Mass and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying.** Advances in Heat Transfer, volume 13, (número 1) 1977: 119-203
- Wood Handbook, 2000. **USDA, Forest Products Laboratory,** pp. 2-2, 2-3, 2-4, 12-1, 12-2, 12-4.
- Z. Sun, G. Carrington, **Effect of stack configuration on wood drying processes,** in: Proceedings of the 6th International IUFRO Wood Drying Conference, Stellenbosch, 1999, pp. 89–98.



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.1.</b> Composición de la estructura celular de la madera	3
<b>Tabla 1.2.</b> Relación entre la gravedad específica y el contenido de humedad.	18
<b>Tabla 2.1:</b> Velocidad del aire a través de- la madera en secado.	32
<b>Tabla 3.1.</b> Listado del número de pruebas realizadas.	44
<b>Tabla 3.2.</b> N° de comparativos de las pruebas experimentales.	44
<b>Tabla 3.3</b> Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 1 (flujo perpendicular) y la prueba 5 (flujo paralelo), a una temperatura de 50 °C y a velocidad de flujo de aire de 1.8 m/s.	47
<b>Tabla 3.4</b> Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 2 (flujo perpendicular) y la prueba 6 (flujo paralelo), a una temperatura de 50 °C y a velocidad de flujo de aire de 2.6 m/s.	50
<b>Tabla 3.5</b> Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 3 (flujo perpendicular) y la prueba 7 (flujo paralelo), a una temperatura de 60 °C y a velocidad de flujo de aire de 1.8 m/s.	52
<b>Tabla 3.6</b> Contenidos de humedad inicial y final de la prueba 4 (flujo perpendicular) y la prueba 8 (flujo paralelo), a una temperatura de 60 °C y a velocidad de flujo de aire de 2.6 m/s.	55
<b>Tabla 3.7.</b> Compendio de los resultados obtenidos en las pruebas de secado de la madera de pino.	56

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Sección transversal de una célula de madera con sus respectivas capas que componen la pared celular.	4
<b>Figura 1.2.</b> Estructura del tallo de las angiospermas (monocotiledóneas, y dicotiledóneas).	6
<b>Figura 1.3.</b> Corte transversal de un tronco de roble blanco: (A) la corteza externa (tejido muerto), (B) corteza interior (tejido vivo), (C) cambium, (D) albura, (E) duramen, (F) médula, y rayos de madera (G).	7
<b>Figura 1.4.</b> Corte transversal de un tronco de pino de ponderosa mostrando sus anillos de crecimiento. Las cintas de color más clara es la madera temprana y las cintas oscuras es la madera tardía. Un anillo anual (crecimiento) está formado de una zona de madera temprana interior y una zona de madera tardía externa.	9
<b>Figura 1.5.</b> Estructura de la madera blanda.	10
<b>Figura 1.6.</b> Los tres tipos básicos de poros: (a) par de poro simple; (b) poro interconectado; (c) poro semi-interconectado. A abertura; C cámara; M pared media de membrana-primaria; S pared secundaria; T tálamo.	11
<b>Figura 1.7.</b> Pino amarillo del Sur ( <i>Pinus spp.</i> ) estructura de corte transversal 20x.	13
<b>Figura 1.8</b> Pino Rojo ( <i>P.resinosa</i> ) estructura de corte transversal 20x.	13
<b>Figura 1.9</b> Arce Rojo ( <i>Acer rubrum</i> ) estructura de corte transversal 20x.	14
<b>Figura 1.10</b> Vista esquemática de la pared celular de una traqueida. P=pared primaria; M = Membrana intermedia; S1 = capa externa de la pared secundaria; S2 = capa media de la pared secundaria; S3 = capa interior de la pared secundaria; W = membrana rugosa que alinea el lumen celular. P'= pared primaria de células contiguas.	15
<b>Figura 2.1:</b> Modelo de corte en troncos de madera dura; (a) Corte plano (b), corte por secciones.	29
<b>Figura 2.2</b> Fase de atemperado A-B, a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad.	33
<b>Figura 2.3.</b> Fase de velocidad constante (B-C), a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad	34



<b>Figura 2.4.</b> Fase periodo decreciente (C-D), a) Contenido de humedad en función del tiempo, b) Velocidad de secado en función del contenido de humedad).	35
<b>Figura 2.5.</b> Factor de fricción adimensional como una función del número Reynolds. La comparación entre los resultados modelados y los datos experimentales.	39
<b>Figura 2.6.</b> Variables de contenido de humedad promedio y perfiles de temperatura, simulados y experimentales a temperatura de 60 °C.	41
<b>Figura 3.1.</b> Diagrama de disposición de la muestra en el túnel de secado y de la conexión de los instrumentos de medición y control	43
<b>Figura 3.2.</b> Corte de las muestras de madera según la orientación de sus fibras.	43
<b>Figura 3.3.</b> Condiciones de temperatura registradas durante la prueba 1 (flujo paralelo) y la prueba 5 (flujo perpendicular), a temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.	45
<b>Figura 3.4.</b> Contenido de humedad superficial y en el centro, registrado durante la prueba de flujo perpendicular y paralelo, a una temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.	46
<b>Figura 3.5.</b> Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 2 (flujo perpendicular) y 6 (flujo paralelo).	48
<b>Figura 3.6.</b> Contenido de humedad en la muestra registrado, en el centro y en la superficie de la muestra, flujo perpendicular y paralelo, a una temperatura de 50°C y velocidad de flujo de aire a 2.6 m/s.	49
<b>Figura 3.7</b> Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 3 (flujo perpendicular) y 7 (flujo paralelo).	51
<b>Figura 3.8.</b> Contenido de humedad en la muestra registrado en el centro y en la superficie de la muestra, flujo paralelo y perpendicular, a una temperatura de 60°C y velocidad de flujo de aire a 1.8 m/s.	52
<b>Figura 3.9.</b> Condiciones de temperatura registradas durante las pruebas 4 (flujo perpendicular) y la prueba 8 (flujo paralelo).	53
<b>Figura 3.10.</b> Contenido de humedad en la muestra registrado en el centro y en la superficie de la muestra, flujo paralelo y perpendicular, a una temperatura de 60°C y velocidad de flujo de aire a 2.6 m/s.	54

## ANEXOS



**Anexo 1.** Foto de la muestra M5, flujo perpendicular, temperatura 50°C, velocidad 1.8 m/s antes del secado.



**Anexo 2.** Foto de la muestra M5, flujo perpendicular, temperatura 50°C, velocidad 1.8 m/s después del secado.



**Anexo 3.** Foto de la muestra M7, flujo perpendicular, temperatura 50°C, velocidad 2.5 m/s antes del secado.



**Anexo 4.** Foto de la muestra M7, flujo perpendicular, temperatura 50°C, velocidad 2.5 m/s después del secado.





**Anexo 5.** Foto de la muestra M12, flujo perpendicular, temperatura 60°C, velocidad 1.8 m/s antes del secado.



**Anexo 6.** Foto de la muestra M12, flujo perpendicular, temperatura 60°C, velocidad 1.8 m/s después del secado.



**Anexo 7.** Foto de la muestra M14, flujo perpendicular, temperatura 60°C, velocidad 2.5 m/s antes del secado.



**Anexo 8.** Foto de la muestra M14, flujo perpendicular, temperatura 60°C, velocidad 2.5 m/s después del secado.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO												
No. DE PRUEBA: M5												
TIPO DE PRUEBA: Temperatura constante: 50°C, Velocidad constante: ventilador 1												
FECHA: 23 de febrero de 2006												
Hora	T1 °C	T2 °C	T3 °C	T <sub>ms</sub>	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %
				FRONT	°C				V	I		
8:40 AM	24.8	24.6	24.8	26.4	26.3	26.2	81.3	79.2	0.0	0.0	34.5	34.2
9:00 AM	28.9	28.8	28.8	50.6	50.5	26.6	77.6	29.9	119.5	6.2	29.8	30.5
9:20 AM	29.7	29.7	29.6	50.9	50.3	26.9	75.4	26.1	115.9	6.0	28.4	29.1
9:40 AM	30.1	30.0	29.9	50.8	50.6	27.1	74.3	25.1	116.2	6.0	28.0	28.5
10:00 AM	31.0	30.7	30.5	50.3	50.3	27.3	73.4	24.2	115.7	6.0	27.2	28.2
10:20 AM	32.3	32.0	31.5	50.8	50.9	27.5	72.7	23.9	115.3	6.0	25.9	28.0
10:40 AM	35.1	34.7	33.3	50.5	50.3	27.5	72.5	23.9	115.2	6.0	24.5	27.8
11:00 AM	37.1	36.7	35.4	50.7	50.9	27.9	72.4	23.8	114.6	6.0	24.1	27.5
11:20 AM	38.6	38.3	37.2	50.9	50.8	28.2	71.3	24.1	113.5	6.0	23.9	27.3
11:40 AM	39.3	39.1	38.2	50.7	50.6	28.3	71.3	24.5	113.3	5.9	23.6	27.2
12:00 PM	40.2	40.1	39.4	50.6	50.5	28.3	70.6	23.9	113.6	6.0	23.2	27.1
12:20 PM	40.5	40.4	39.7	50.3	50.2	28.3	70.0	24.1	113.6	6.0	22.9	27.0
12:40 PM	40.9	40.7	40.0	50.9	50.8	28.4	69.5	23.9	114.1	6.0	22.6	26.9
1:00 PM	41.3	41.2	40.6	50.7	50.7	28.5	69.5	23.5	112.2	5.9	22.5	26.7
1:20 PM	41.2	41.1	40.5	50.0	49.8	28.5	68.6	23.6	112.3	5.9	22.3	26.2
1:40 PM	41.3	41.2	40.7	50.5	50.3	28.7	69.6	23.8	123.0	5.9	22.0	26.0
2:00 PM	41.5	41.4	40.9	50.2	50.2	28.4	69.3	24.0	112.0	5.9	21.8	25.9
2:20 PM	41.7	41.7	41.0	50.0	49.9	28.5	69.4	23.8	112.2	5.9	21.6	25.8
2:40 PM	41.9	41.8	41.2	50.6	50.5	28.5	69.3	23.7	111.8	5.9	21.4	25.6
3:00 PM	42.0	41.9	41.4	49.9	49.7	28.2	69.2	23.6	112.4	5.9	20.7	25.4
3:20 PM	42.1	42.0	41.5	50.1	50.0	28.3	70.4	23.9	112.4	5.9	20.5	25.1
3:40 PM	42.2	42.1	42.0	50.2	50.0	28.3	69.8	23.5	112.3	5.9	20.2	24.7
4:00 PM	42.2	42.1	41.7	50.2	50.1	28.0	71.2	23.8	112.7	5.8	20.0	24.5
4:20 PM	42.3	42.2	41.8	50.5	50.2	27.9	71.7	24.0	112.6	5.8	19.7	24.1
4:40 PM	42.3	42.2	41.8	50.2	50.1	27.6	71.6	23.6	113.0	5.8	19.8	23.5

**Anexo 9:** Tabla de datos obtenidos de la prueba M5: Flujo perpendicular, temperatura 50 °C, a 1.8 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO												
No. DE PRUEBA: M7												
TIPO DE PRUEBA: Temperatura constante: 50°C, Velocidad constante: ventilador 1 y 2												
FECHA: 2 de marzo de 2006												
Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms</sub> FRON	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %
	Sup	Cen	Inter	°C	°C				V	I		
9:00 AM	24.0	24.0	24.0	25.1	25.0	25.1	88.6	82.4	0.0	0.0	35.5	33.0
9:20 AM	27.5	27.1	27.2	47.5	46.9	25.8	84.4	32.9	131.1	6.8	28.0	29.5
9:40 AM	29.3	28.9	29.0	50.0	49.6	26.1	82.2	25.8	135.0	7.0	26.8	28.9
10:00 AM	30.9	30.0	30.3	50.2	49.9	26.3	81.8	25.8	134.3	6.9	25.9	28.5
10:20 AM	34.0	32.1	32.6	50.3	50.0	26.7	81.5	25.0	132.8	6.8	25.4	28.0
10:40 AM	37.3	35.3	35.8	50.2	49.9	26.8	81.0	24.4	133.1	6.8	25.1	27.9
11:00 AM	39.3	37.9	38.2	50.4	50.0	26.7	79.7	23.9	132.9	6.8	24.9	27.7
11:20 AM	40.4	39.5	39.9	50.3	50.0	27.0	80.7	23.9	132.7	6.8	24.6	27.6
11:40 AM	41.4	40.7	40.9	50.9	50.6	27.3	80.8	23.6	133.3	6.8	24.3	27.4
12:00 PM	42.0	41.3	41.5	50.5	50.2	27.5	79.2	23.9	130.8	6.7	24.0	27.3
12:20 PM	42.6	41.9	42.0	50.9	50.6	27.8	79.2	24.0	130.8	6.7	23.8	27.1
12:40 PM	42.4	41.7	41.8	50.1	49.8	28.0	80.0	24.4	129.7	6.7	23.6	27.0
1:00 PM	43.0	42.0	42.2	50.5	50.2	27.9	79.0	23.9	129.9	6.7	23.4	26.8
1:20 PM	43.4	42.6	42.8	50.7	50.3	27.8	78.9	23.6	130.0	6.7	23.1	26.5
1:40 PM	43.8	42.9	43.0	50.7	50.4	27.9	79.0	23.9	129.9	6.7	22.8	26.0
2:00 PM	43.6	42.7	42.9	49.9	49.5	27.9	79.4	24.8	127.5	6.7	22.6	25.7
2:20 PM	44.0	42.9	43.0	50.3	50.0	28.0	79.2	24.2	128.7	6.6	22.3	25.3
2:40 PM	44.2	43.1	43.2	50.4	50.0	28.0	80.4	24.4	129.0	6.6	22.1	25.1
3:00 PM	44.5	43.2	43.3	50.4	50.0	28.1	80.7	24.3	129.2	6.6	22.0	24.7
3:20 PM	44.6	43.3	43.4	50.3	50.0	27.9	81.3	24.7	128.8	6.6	21.9	24.4
3:40 PM	44.7	43.4	43.6	50.1	49.8	27.8	82.1	25.0	129.0	6.6	21.6	23.9
4:00 PM	44.7	43.3	43.5	49.9	49.7	27.6	82.3	24.8	129.3	6.6	21.5	23.1
4:20 PM	44.8	43.3	43.5	50.0	49.7	27.8	83.9	24.9	129.5	6.6	21.3	22.6
4:40 PM	44.8	43.4	43.6	49.9	49.5	27.6	84.1	25.4	129.7	6.6	21.1	21.9
5:00 PM	45.4	43.9	44.1	50.7	50.4	27.5	83.9	24.3	131.7	6.7	20.7	21.4

**Anexo 10:** Tabla de datos obtenidos de la prueba M7: Flujo perpendicular, temperatura 50 °C, a 2.5 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO													
No. DE PRUEBA: M12													
TIPO DE PRUEBA: Temperatura constante: 60°C, Velocidad constante: ventilador 1													
FECHA: 15 de marzo de 2006													
Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms</sub> FRON	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %	
	Sup	Cen	Inter	°C	°C				V	I			
9:00 AM	25.5	25.0	25.5	27.6	27.5	27.2	69.5	77.0	0.0	0.0	32.3	31.2	
9:20 AM	31.3	30.4	30.8	59.5	58.8	27.8	66.8	23.3	135.4	7.4	26.6	27.6	
9:40 AM	35.5	32.6	33.7	60.0	59.5	28.0	64.9	19.4	135.3	7.4	25.8	27.1	
10:00 AM	41.6	37.9	39.0	60.5	59.9	28.2	63.0	17.6	135.1	7.2	25.2	26.8	
10:20 AM	45.1	41.0	43.0	60.7	60.1	28.4	59.6	16.3	135.3	7.4	24.7	26.6	
10:40 AM	47.7	44.5	45.4	60.9	60.4	28.8	55.7	15.3	135.7	7.3	24.3	26.2	
11:00 AM	49.5	46.1	47.2	61.2	60.8	29.1	54.3	14.9	135.8	6.8	24.1	26.0	
11:20 AM	49.3	46.5	47.3	59.5	59.0	29.3	52.4	15.4	129.7	6.4	23.8	25.8	
11:40 AM	50.8	47.0	48.3	60.6	60.0	29.6	54.4	15.6	132.1	6.5	23.4	25.5	
12:00 PM	51.8	47.8	49.2	60.3	59.9	29.5	57.1	16.3	132.1	6.5	23.0	25.2	
12:20 PM	52.3	48.3	49.6	60.0	59.8	29.5	56.6	16.2	131.9	6.4	22.6	24.7	
12:40 PM	52.7	49.1	49.9	60.5	60.2	29.5	56.4	16.2	132.0	6.5	22.2	24.3	
1:00 PM	53.1	49.5	50.4	60.5	60.0	29.6	54.9	15.6	132.9	6.5	21.6	24.0	
1:20 PM	53.5	50.3	50.8	61.2	60.9	29.5	56.2	15.7	133.0	6.5	21.2	23.6	
1:40 PM	53.3	50.1	50.7	61.0	60.3	29.9	56.4	16.1	130.2	6.4	21.0	23.2	
2:00 PM	53.3	50.0	50.8	60.5	59.8	29.7	56.5	16.2	130.2	6.4	20.8	22.6	
2:20 PM	53.4	50.1	51.0	60.6	60.1	29.5	56.0	16.0	130.5	6.5	20.5	22.0	
2:40 PM	53.5	50.3	51.3	60.3	59.5	29.4	55.4	15.8	130.4	6.5	20.3	21.4	
3:00 PM	53.5	50.3	51.3	60.1	59.6	29.3	55.1	15.6	130.7	6.5	20.0	20.9	
3:20 PM	53.8	50.6	51.6	60.3	59.5	29.0	57.4	15.9	132.2	6.7	19.6	20.4	
3:40 PM	53.9	50.8	51.8	60.3	59.6	28.3	58.1	15.8	131.5	6.7	19.4	19.9	
4:00 PM	54.1	50.9	52.0	60.3	60.0	28.2	58.4	15.7	132.4	6.7	19.1	19.4	
4:20 PM	54.0	51.0	52.0	59.8	59.6	28.2	59.6	15.9	131.8	6.7	19.0	19.2	
4:40 PM	54.2	51.2	52.3	60.0	59.8	28.1	58.4	15.8	132.1	6.7	18.9	19.0	
5:00 PM	54.3	51.3	52.5	60.1	59.8	28.1	59.4	18.7	132.3	6.7	18.7	18.9	

**Anexo 11:** Tabla de datos obtenidos de la prueba M12: Flujo perpendicular, temperatura 60°C, a 1.8 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO													
No. DE PRUEBA: M14													
TIPO DE PRUEBA: Temperatura constante: 60°C, Velocidad constante: ventilador 1 y 2													
FECHA: 17 de marzo de 2006													
Hora	T1°C Sup	T2°C Cen	T3°C Inter	T <sub>ms</sub> FRON °C	T <sub>ms</sub> POST °C	T <sub>amb</sub> °C	Φ <sub>amb</sub> %	Φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %	
									V	I			
9:00 AM	24.1	24.2	24.3	26.7	26.6	26.5	72.6	71.7	0.0	0.0	35.8	30.3	
9:20 AM	34.4	32.6	32.8	58.4	57.7	27.0	65.9	21.2	131.1	6.8	27.3	28.1	
9:40 AM	39.9	37.6	38.1	60.0	58.9	27.1	62.1	18.3	135.0	7.0	26.1	27.3	
10:00 AM	44.2	42.4	43.2	60.1	58.9	27.1	61.4	16.8	134.3	6.9	25.6	26.5	
10:20 AM	46.3	44.8	45.0	59.4	58.4	26.9	61.9	17.0	132.8	6.8	25.3	26.0	
10:40 AM	47.7	46.3	46.8	60.1	59.0	26.8	63.5	17.0	133.1	6.8	24.7	25.8	
11:00 AM	48.7	47.3	47.9	60.1	59.0	27.0	61.6	15.9	132.9	6.8	24.3	25.6	
11:20 AM	49.6	48.3	48.8	60.2	59.1	27.2	59.8	15.8	132.7	6.8	23.7	25.5	
11:40 AM	50.8	49.5	49.9	60.1	59.1	27.6	58.8	15.8	133.3	6.8	23.3	25.3	
12:00 PM	51.7	50.5	50.8	61.2	60.6	28.0	58.4	15.6	130.8	6.7	23.0	25.0	
12:20 PM	52.0	50.7	50.9	61.5	60.7	28.2	56.8	15.6	130.8	6.7	22.3	24.8	
12:40 PM	52.3	50.8	51.2	61.1	60.4	28.1	56.2	15.3	129.7	6.7	21.6	24.4	
1:00 PM	53.0	51.2	51.6	61.1	60.4	28.3	57.1	15.4	129.9	6.7	21.2	23.9	
1:20 PM	52.6	50.7	51.0	61.4	60.5	28.4	57.7	16.1	130.0	6.7	21.0	23.5	
1:40 PM	52.4	50.4	50.7	60.2	59.7	28.1	58.7	16.1	129.9	6.7	20.7	23.1	
2:00 PM	52.8	50.7	51.1	59.4	58.9	28.1	59.7	15.9	127.5	6.7	20.5	22.8	
2:20 PM	52.7	50.6	51.1	60.0	59.2	28.1	59.4	16.2	128.7	6.6	20.3	22.5	
2:40 PM	53.1	50.9	51.5	60.3	59.5	28.2	60.5	16.4	129.0	6.6	19.6	22.1	
3:00 PM	53.3	51.0	51.6	59.8	59.1	28.3	60.1	16.6	129.2	6.6	19.3	21.8	
3:20 PM	53.5	51.1	51.9	60.0	59.3	28.3	59.9	16.4	128.8	6.6	18.9	21.4	
3:40 PM	53.6	51.1	52.0	60.2	59.7	28.3	59.7	16.2	129.0	6.6	18.6	21.1	
4:00 PM	53.8	51.2	52.1	60.3	59.9	28.2	60.1	16.1	129.3	6.6	18.2	20.8	
4:20 PM	53.8	51.3	52.2	59.8	59.1	28.0	61.0	16.2	129.5	6.6	17.8	20.5	
4:40 PM	53.8	51.3	52.1	59.8	59.2	28.0	62.0	16.2	129.7	6.6	17.5	20.1	
5:00 PM	53.7	51.3	52.1	59.5	59.0	27.7	61.8	16.5	131.7	6.7	17.1	19.7	

**Anexo 12:** Tabla de datos obtenidos de la prueba M14: Flujo perpendicular, temperatura 60°C, a 2.5 m/s.



**FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO**

No. DE PRUEBA: MP1

TIPO DE PRUEBA: Flujo paralelo, Temperatura constante: 50°C, Velocidad constante: ventilador 1

FECHA: 3 de abril de 2006

Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms FRON</sub>	T <sub>ms POST</sub>	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %
	Sup	Cen	Inter	°C	°C	V	I					
9:00 AM	26.8	26.7	26.5	27.4	27.2	26.9	62.10	69.3	0.0	0.0	70.4	40.5
9:20 AM	28.1	27.5	27.7	50.0	49.7	27.0	60.90	27.6	111.0	5.2	57.8	36.6
9:40 AM	30.0	29.2	29.7	50.0	49.6	27.4	59.80	24.6	110.8	5.2	52.6	35.5
10:00 AM	34.5	33.3	34.0	50.4	50.0	27.6	56.80	22.7	110.5	5.2	46.0	34.6
10:20 AM	38.4	37.0	38.0	50.8	50.4	27.7	53.20	20.8	111.8	5.3	40.0	34.2
10:40 AM	40.0	39.3	39.8	51.4	50.9	27.8	52.40	20.1	111.7	5.2	37.1	34.0
11:00 AM	40.8	40.2	40.6	51.0	50.7	28.1	48.30	19.2	110.7	5.2	34.0	33.9
11:20 AM	41.5	41.0	41.3	51.0	50.6	28.2	47.20	18.9	109.7	5.2	32.0	33.7
11:40 AM	41.7	41.2	41.5	50.6	50.3	28.4	46.40	18.3	108.9	5.1	30.0	33.5
12:00 PM	42.3	41.8	42.1	50.8	50.6	28.3	44.30	17.9	108.9	5.1	28.6	33.3
12:20 PM	42.7	42.2	42.5	50.8	50.4	28.3	42.30	17.3	108.9	5.1	27.5	33.0
12:40 PM	43.0	42.4	42.7	51.2	50.7	28.7	42.60	16.9	108.9	5.1	25.8	32.0
1:00 PM	43.0	42.4	42.7	50.5	50.4	28.8	42.90	17.2	107.2	5.1	24.4	31.3
1:20 PM	43.3	42.6	42.9	50.4	50.3	28.5	44.30	17.6	107.2	5.1	22.1	30.4
1:40 PM	43.6	42.8	43.2	50.2	50.0	28.7	44.30	17.8	107.1	5.1	19.6	30.1
2:00 PM	43.9	43.1	43.2	50.7	50.3	28.7	43.90	17.9	107.5	5.1	18.2	29.9
2:20 PM	43.9	42.9	43.1	50.1	49.8	28.6	44.00	17.9	105.8	5.0	17.0	29.3
2:40 PM	43.9	42.9	43.1	50.0	49.7	28.5	43.90	17.7	106.0	5.0	16.1	28.9
3:00 PM	44.0	42.9	43.1	50.2	49.9	28.7	45.40	17.7	105.9	5.0	14.5	28.6
3:20 PM	44.0	42.8	43.3	49.9	49.7	28.6	45.20	17.7	106.1	5.0	13.2	28.4
3:40 PM	44.1	43.0	43.3	50.2	50.0	28.7	46.50	17.8	106.6	5.0	11.0	28.1
4:00 PM	44.1	43.2	43.3	50.3	50.0	28.5	47.20	18.1	106.8	5.1	10.4	27.9
4:20 PM	44.1	43.2	43.4	50.2	49.8	28.4	48.40	18.4	106.7	5.1	9.3	27.4
4:40 PM	44.0	43.1	43.3	50.4	50.0	28.4	50.50	18.5	107.0	5.1	9.1	27.1
5:00 PM	43.7	42.9	43.0	49.5	49.1	28.3	51.80	19.1	106.3	5.0	8.8	26.2

**Anexo 13:** Tabla de datos obtenidos de la prueba MP1: Flujo paralelo, temperatura 50°C, a 1.8 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO													
No. DE PRUEBA: MP4													
TIPO DE PRUEBA: Flujo paralelo, Temperatura constante: 50°C, Velocidad constante: ventilador 1 y 2													
FECHA: 24 de abril de 2006													
Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms</sub> FRON	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %	
	Sup	Cen	Inter	°C	°C				V	I			
9:00 AM	26.0	26.0	26.0	27.0	27.1	27.7	76.80	85.8	126.1	0.0	72.8	53.5	
9:20 AM	29.7	29.6	29.5	48.4	48.1	28.0	75.80	35.4	125.2	6.2	59.1	49.4	
9:40 AM	31.4	30.4	30.9	49.6	49.3	28.2	75.20	32.0	125.4	6.2	55.3	48.2	
10:00 AM	33.5	31.2	32.2	49.9	49.5	28.3	74.50	30.6	124.0	6.2	52.9	47.6	
10:20 AM	35.5	32.4	33.9	49.9	49.4	28.5	73.20	30.0	125.4	6.1	49.0	47.1	
10:40 AM	37.1	34.0	35.4	50.7	50.2	28.6	72.00	28.9	124.0	6.1	45.5	46.8	
11:00 AM	38.5	35.8	37.1	50.3	49.9	28.7	69.80	28.2	124.3	6.2	41.6	46.5	
11:20 AM	39.7	37.5	38.5	50.5	50.1	29.0	66.60	27.2	124.2	6.2	40.1	46.0	
11:40 AM	40.8	39.0	39.8	51.1	50.8	29.0	65.50	26.6	121.9	6.1	38.2	45.6	
12:00 PM	41.3	39.9	40.5	50.5	50.2	29.4	63.90	26.7	122.1	6.1	37.8	45.4	
12:20 PM	42.1	40.9	41.4	51.0	50.7	29.6	63.70	26.6	119.0	6.0	36.8	45.1	
12:40 PM	42.3	41.2	41.6	50.5	50.0	29.8	63.00	27.2	118.9	6.0	36.2	44.8	
1:00 PM	42.6	41.8	42.0	50.5	50.1	29.8	63.60	27.7	119.0	6.0	35.4	44.6	
1:20 PM	43.1	42.4	42.5	50.7	50.3	30.4	63.50	27.0	116.9	5.9	34.9	44.4	
1:40 PM	43.2	42.4	42.5	50.0	49.7	30.3	63.20	28.1	117.0	5.9	34.3	44.0	
2:00 PM	43.3	42.5	42.7	50.1	49.6	30.0	62.40	27.7	117.5	5.9	33.5	43.7	
2:20 PM	43.5	42.9	43.0	50.3	49.9	30.5	60.00	26.7	117.2	5.9	32.5	43.2	
2:40 PM	43.7	43.1	43.3	50.1	49.7	30.2	61.10	27.0	117.6	5.9	31.0	41.0	
3:00 PM	43.9	43.4	43.6	50.5	50.0	30.5	61.40	27.1	117.5	6.0	29.2	40.0	
3:20 PM	44.2	43.7	43.9	50.5	49.9	30.2	61.00	26.8	117.1	5.9	28.4	38.8	
3:40 PM	44.5	43.8	44.2	50.5	50.0	30.6	60.70	26.8	117.2	5.9	27.8	37.1	
4:00 PM	44.4	43.9	44.2	50.3	49.9	30.6	59.50	26.3	117.3	6.0	26.8	35.1	
4:20 PM	44.8	44.0	44.6	50.1	49.8	30.2	63.40	27.8	117.6	6.0	25.6	33.8	
4:40 PM	44.9	44.0	44.6	49.9	49.5	30.3	64.20	27.9	117.4	6.0	24.8	32.7	
5:00 PM	44.8	43.9	44.6	50.0	49.6	30.3	63.80	27.7	118.1	6.0	23.6	31.6	

Anexo 14: Tabla de datos obtenidos de la prueba MP4: Flujo paralelo, temperatura 50°C, a 2.5 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO												
No. DE PRUEBA: MP5												
TIPO DE PRUEBA: Flujo paralelo, Temperatura constante: 60°C, Velocidad constante: ventilador 1												
FECHA: 26 de abril de 2006												
Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms</sub> FRON	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %
	Sup	Cen	Inter	°C	°C				V	I		
9:00 AM	26.0	25.4	25.2	27.5	27.8	27.7	89.4	76.1	0.0	0.0	78.2	60.9
9:20 AM	32.3	32.0	31.9	58.9	57.9	28.2	88.9	25.5	130.5	6.6	45.2	53.3
9:40 AM	35.3	34.7	34.8	60.0	59.3	28.3	88.2	22.1	131.8	6.6	37.3	50.5
10:00 AM	40.9	39.6	39.9	60.0	59.4	28.6	86.6	21.0	131.0	6.6	33.8	49.2
10:20 AM	45.6	44.5	44.8	60.7	60.2	28.7	83.7	19.7	131.4	6.6	29.3	48.8
10:40 AM	47.8	47.2	47.6	60.9	60.4	28.8	83.6	19.7	131.4	6.6	28.2	48.5
11:00 AM	49.3	48.8	49.2	60.8	60.4	29.1	81.3	19.3	130.6	6.6	26.0	48.1
11:20 AM	50.6	49.8	50.2	60.7	60.3	29.3	80.0	19.2	130.5	6.6	24.3	47.1
11:40 AM	51.0	50.3	50.7	60.5	60.1	29.6	78.8	19.1	129.1	6.5	23.7	45.5
12:00 PM	51.6	50.7	51.2	60.7	60.4	29.8	77.8	19.1	128.9	6.5	22.6	44.0
12:20 PM	52.2	51.0	51.5	60.8	60.4	30.0	75.8	19.2	128.2	6.5	21.9	41.8
12:40 PM	52.6	51.5	52.0	60.9	60.6	30.0	77.2	19.2	128.0	6.5	21.6	40.2
1:00 PM	53.4	51.8	52.2	60.9	60.5	30.2	76.6	19.2	127.8	6.5	21.4	39.5
1:20 PM	54.0	52.2	52.7	60.9	60.5	30.4	76.4	19.1	127.4	6.5	21.2	39.1
1:40 PM	53.2	52.0	52.5	60.8	60.0	30.4	75.4	19.4	125.8	6.4	20.9	38.8
2:00 PM	53.2	52.0	52.4	60.4	59.7	30.3	77.1	19.1	126.9	6.5	19.8	38.0
2:20 PM	53.1	52.1	52.6	60.1	60.0	30.7	76.4	19.5	126.1	6.4	19.4	36.7
2:40 PM	53.3	52.2	52.7	60.3	60.3	30.5	76.3	19.3	125.9	6.4	18.9	35.8
3:00 PM	53.5	52.6	53.0	60.8	60.7	30.4	75.4	19.2	125.1	6.5	18.6	35.0
3:20 PM	54.0	52.4	52.8	61.0	59.6	30.5	76.0	19.4	125.6	6.4	18.2	33.5
3:40 PM	53.9	52.3	53.1	60.0	59.5	30.5	76.2	19.6	126.6	6.4	18.0	32.8
4:00 PM	53.8	52.8	53.3	59.9	60.0	30.4	77.3	19.3	125.4	6.4	17.6	32.1
4:20 PM	54.1	52.9	53.3	60.2	60.0	30.2	77.0	19.5	125.5	6.4	16.7	31.8
4:40 PM	54.2	52.9	53.1	60.2	59.7	30.3	75.8	19.5	125.6	6.4	16.1	31.0
5:00 PM	53.4	52.8	53.1	60.0	59.5	30.4	75.0	19.2	125.7	6.4	15.4	30.4

**Anexo 15:** Tabla de datos obtenidos de la prueba MP5: Flujo paralelo, temperatura 60°C, a 1.8 m/s.



FORMATO UTILIZADO PARA LA TOMA DE LECTURAS DEL PROCESO DE SECADO DE LA MADERA DE PINO												
No. DE PRUEBA: MP7												
TIPO DE PRUEBA: Flujo paralelo, Temperatura constante: 60°C, Velocidad constante: ventilador 1 y 2												
FECHA: 27 de abril de 2006												
Hora	T1°C	T2°C	T3°C	T <sub>ms</sub> FRON	T <sub>ms</sub> POST	T <sub>amb</sub> °C	φ <sub>amb</sub> %	φ <sub>ms</sub> %	Resistencia 1		CH <sub>sup</sub> %	CH <sub>cen</sub> %
	Sup	Cen	Inter	°C	°C				V	I		
9:00 AM	21.0	20.0	20.6	27.2	27.6	27.9	73.70	73.2	0.0	0.0	81.1	68.5
9:20 AM	30.4	29.7	30.0	52.5	52.3	28.1	73.50	28.4	135.5	6.6	71.2	64.4
9:40 AM	33.3	33.6	33.8	59.6	59.2	28.5	73.10	23.1	150.2	7.0	67.1	60.5
10:00 AM	38.9	37.9	38.3	59.2	59.2	28.7	72.20	23.0	151.2	7.0	62.5	58.8
10:20 AM	42.4	42.1	42.5	59.2	59.1	28.8	71.00	19.9	150.7	6.9	59.2	57.6
10:40 AM	44.6	44.5	44.7	59.1	59.9	29.0	69.70	19.8	149.1	6.8	55.1	57.1
11:00 AM	46.6	46.2	46.4	59.9	59.9	29.4	69.30	19.3	150.3	6.9	48.5	56.5
11:20 AM	47.9	47.7	47.6	59.9	60.2	29.5	68.20	19.1	150.1	6.8	43.1	56.1
11:40 AM	48.5	48.2	48.1	60.2	59.7	29.5	67.10	19.1	148.6	6.8	42.1	54.1
12:00 PM	49.0	48.8	48.7	59.7	59.5	29.7	62.90	18.3	148.5	7.0	39.0	50.5
12:20 PM	50.0	49.6	49.7	59.5	60.1	30.8	63.70	18.2	149.1	6.6	36.4	47.7
12:40 PM	50.6	50.3	50.1	60.1	60.3	30.5	62.70	18.1	148.6	6.5	34.8	44.6
1:00 PM	50.6	50.3	50.2	60.3	60.0	30.7	61.90	18.2	147.1	6.5	33.1	42.8
1:20 PM	50.7	50.5	50.3	60.0	59.4	30.7	60.80	18.3	149.6	6.5	31.9	39.3
1:40 PM	50.7	50.6	50.4	59.4	59.4	30.6	62.00	19.0	146.1	6.4	30.4	37.7
2:00 PM	51.1	50.8	50.7	59.4	60.0	31.3	62.70	18.7	146.4	6.4	28.5	35.1
2:20 PM	51.5	51.3	51.2	60.0	60.1	31.5	62.10	18.6	146.6	6.4	27.1	32.0
2:40 PM	51.7	51.9	51.4	60.1	59.8	31.5	62.50	18.5	146.7	6.4	26.0	30.3
3:00 PM	52.2	52.4	51.8	59.8	60.0	31.6	62.40	18.6	146.1	6.4	24.4	28.2
3:20 PM	52.8	52.7	52.3	60.0	60.2	31.9	63.40	18.6	146.7	6.4	22.5	26.8
3:40 PM	53.1	52.8	52.6	60.2	60.3	32.0	63.80	18.6	147.1	6.4	21.0	25.6
4:00 PM	53.3	53.0	52.4	60.3	60.2	32.0	63.80	18.6	147.4	6.4	20.0	24.6
4:20 PM	53.5	53.0	53.2	60.2	60.0	32.0	63.90	18.6	147.1	6.4	18.9	23.6
4:40 PM	53.7	53.1	53.3	60.0	60.0	31.9	63.90	18.5	147.5	6.4	18.1	22.5
5:00 PM	54.0	53.2	53.2	60.1	60.1	31.8	64.60	18.5	147.9	6.4	17.0	21.5

**Anexo 16:** Tabla de datos obtenidos de la prueba MP7: Flujo paralelo, temperatura 60°C, a 2.5 m/s.