

UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

ANALISIS COMPARATIVO DE TRES SISTEMAS DE SECADO CON MADERA DE ENCINO (*Quercus sp.*)

MARTHA ELENA FUENTES LOPEZ



DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARA

OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS FORESTALES

DX 85336
- LS1430

CHAPINGO, MÉXICO. 1996

Esta tesis fue realizada bajo la dirección del siguiente Comité, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS: EN CIENCIAS FORESTALES.

PRESIDENTE:



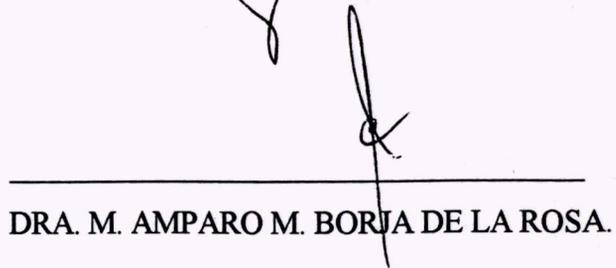
M.C. MARIO FUENTES SALINAS

ASESOR:



Ph.D. FRANCISCO J. ZAMUDIO SÁNCHEZ.

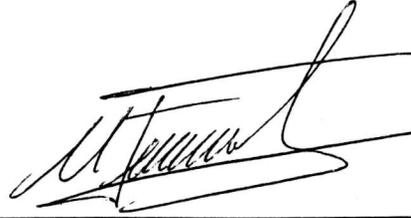
ASESOR:



DRA. M. AMPARO M. BORJA DE LA ROSA.

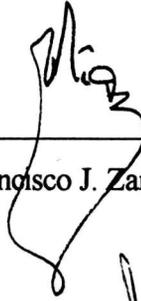
El Jurado del Exámen de Grado de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, lo conformaron las siguientes personas.

Presidente:



M.C. Mario Fuentes Salinas.

Asesor:



Ph D. Francisco J. Zamudio Sánchez.

Asesor:



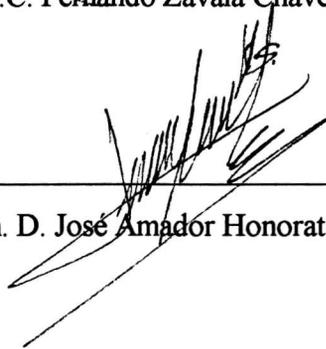
Dra. M. Amparo M. Borja de la Rosa.

Representante de la Coordinación
de Estudios de Posgrado de la UACH.



M.C. Fernando Zavala Chávez.

Representante de la Coordinación
de Estudios de Posgrado de la DiCiFo.



Ph. D. José Amador Honorato Salazar.

Quienes revisaron y aprobaron la tesis presentada.

Chapingo, México. 1996

D E D I C A T O R I A

**A LA MEMORIA DE MI ADORADA MADRE:
CONCEPCIÓN.**

CON AMOR A MIS HIJOS Y ESPOSO:

GERMÁN SINUHÉ,

SILVIANA ISIS

Y

J. CARMEN

A MI PADRE CON CARÍÑO:

SILVINO

A MIS QUERIDOS HERMANOS

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias a través del Campo Experimental San Martinito, por el decidido apoyo otorgados en mi formación académica y como investigador.

A la Universidad Autónoma Chapingo a través de la División de Ciencias Forestales por su apoyo en mi formación profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que me otorgó.

Al Consejo particular por sus atinados consejos y sugerencias tanto para mejorar este documento como de una acertada dirección del mismo en aras de conseguir mi superación personal .

Al Ingeniero Rogelio Flores V. y al M.C. Juan Quintanar O., incondicionales amigos y compañeros de trabajo que desinteresadamente me brindaron el apoyo necesario en el momento preciso.

Al Ing. Alfredo Cabrera, quien me brindó su confianza al facilitarme el volumen necesario de madera de encino y me apoyó incondicionalmente en la colecta de trocería.

Al Programa Forestal de la SEMARNAP del Gobierno del Estado de Guanajuato, por el apoyo y facilidades otorgadas.

Al Ingeniero Víctor Díaz G. y el Sr. Oliveros Del Llano propietario de la empresa “Maderas Narcea”, por sus finas atenciones y su disponibilidad al proporcionar la información complementaria de este documento.

A los señores Valente y Francisco Pérez por su participación en el derribo y troceado del arbolado. A los señores Aniceto Juárez, Mauro Benítez y Guadalupe Rodríguez por el apoyo otorgado durante la fase experimental del secado de la madera.

Mis más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra manera me apoyaron en la culminación de mi trayectoria académica y en la realización del presente trabajo.

INDICE GENERAL.

CONTENIDO

PÁG.

1.- INTRODUCCION.....	1
2.- OBJETIVOS.....	3
3.- ANTECEDENTES.....	4
3.1.-SECADO AL AIRE LIBRE.....	4
3.2.-SECADO EN SECADOR SOLAR.....	6
3.3.-SECADO EN SECADOR CONVENCIONAL.....	24
4.-MATERIALES Y METODOS.....	31
4.1.-MATERIALES.....	31
4.1.1.-Colecta del material de estudio.....	31
4.1.2.-Preparacion de la madera aserrada.....	32
4.1.3.-Patio de secado.....	35
4.1.4.-Secador solar.....	35
4.1.5.-Secador convencional.....	36
4.1.6.-Equipo auxiliar.....	37
4.2.- MÉTODOS.....	37
4.2.1.-Inspeccion inicial de las tablas.....	38
4.2.2.-Preparacion de muestras de secado.....	39
4.2.3.-Montaje de pilas para el secado al aire libre y control de secado.....	44

CONTENIDO

PÁG.

4.2.4.-Montaje de pilas para el secado solar y control de secado.....	47
4.2.5.-Montaje de pilas para el secado convencional y control de secado.....	50
4.2.6.-Evaluación de la calidad de secado.....	54
4.2.7.-Evaluación de los tiempos de secado.....	57
4.2.8.-Evaluación del costo de infraestructura y equipos requeridos en en el secado.....	62
4.2.8.1.-Costos del secado al aire libre.....	64
4.2.8.2.-Costos del secado en secador solar.....	65
4.2.8.3.-Costos del secado en secador convencional.....	66
4.2.9.-Evaluación del consumo de energía de insumos.....	67
5.-RESULTADOS.....	68
5.1.-CALIDAD DE LA MADERA SECA.....	68
5.1.1.-Madera secada al aire libre.....	68
5.1.2.-Madera secada en el secador solar.....	72
5.1.3.-Madera secada en el secador convencional.....	75
5.1.4.-Comparación de calidad entre los tres sistemas de secado.....	78
5.2.-RITMO Y TIEMPOS DE SECADO.....	80
5.2.1.-Ritmo de secado.....	80
5.2.2.-Tiempos de secado.....	83
5.2.2.1.-Secado al aire libre.....	83
5.2.2.2.-Secado en secador solar.....	84

CONTENIDO	PÁG.
5.2.2.3.-Secado en secador convencional.....	86
5.2.2.4.-Relacion ajustada de tiempos de secado entre sistemas.....	87
5.3.-COSTOS DE LOS PROCESOS DE SECADO BAJO CADA SISTEMA.....	90
5.3.1.-Costos del secado al aire libre.....	90
5.3.2.-Costos del secado en secador solar.....	94
5.3.3.-Costos del secado en secador convencional.....	97
5.3.4.-Costos comparativos entre los tres sistemas de secado.....	102
6.-ANALISIS Y DISCUSION.....	104
6.1.-CALIDAD DE SECADO.....	104
6.2.-TIEMPOS DE SECADO.....	110
6.3.-COSTOS DE SECADO.....	113
7.-CONCLUSIONES.....	118
8.-RECOMENDACIONES.....	120
9.-LITERATURA CITADA.....	121
10.-ANEXOS.....	127

I.-CONDICIONES DE TEMPERATURA Y TIEMPOS REALES EN EL SECADOR CONVENCIONAL. PROGRAMA ESPECIAL.

II.-PROGRAMA DE SAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA PROMEDIO

Y CURVA EQUIVALENTE DE SECADO AL AIRE LIBRE Y CONVENCIONAL
DESDE 63% DE CH INICIAL AL 12% DE CH FINAL.

III.-PROGRAMA DE SAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CURVA GUÍA Y
CURVA EQUIVALENTE DE SECADO SOLAR DESDE 63% DE CH INICIAL
AL 12% DE DE CONTENIDO DE HUMEDAD FINAL.

IV.-VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO AL AIRE.

V.-VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO SOLAR.

VI.-VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO
CONVENCIONAL.

VII.-COSTOS ESTIMADOS DE SECADO Y DE MADERA SECA DE ENCINO EN
LOS TRES SISTEMAS DE SECADO DESARROLLADOS.

INDICE DE CUADROS.

CUADRO	TÍTULO	PÁG.
1.	Programa de secado Especial I. para secado de madera aserrada de encino de 3/4" de espesor.....	52
2.	Porcentajes de valores permisibles de defectos evaluados. NCh.178.....	55
3.	Grados de calidad por factor de desclasificación (F.D).....	56
4.	Clasificación de la calidad de secado.....	56
5.	Factores económicos considerados en el secado al aire libre.....	64
6.	Factores económicos considerados en el secado solar.....	65
7.	Factores económicos considerados en el secado convencional.....	66
8.	Número de tablas distribuídas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado al aire libre.....	69
9.	Indice de calidad de secado al aire libre respecto a grietas, rajaduras y alabeos.....	70
10.	Indice de calidad de secado resultante al aire libre.....	71
11.	Participación porcentual de desclasificación de la madera secada al aire libre.....	71
12.	Número de tablas distribuídas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado solar.....	72
13.	Indice de calidad de secado solar respecto a grietas, rajaduras y alabeos.....	73
14.	Indice de calidad resultante en el secador solar.....	74
15.	Participación porcentual de desclasificación de la madera secada en secador solar.....	74

CUADRO	TÍTULO	PÁG.
16.	Número de tablas distribuídas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado convencional.....	75
17.	Índice de calidad de secado convencional respecto a grietas, rajaduras y alabeos.....	76
18.	Índice de calidad de secado convencional resultante.....	77
19.	Participación porcentual de desclasificación de la madera secada en el secador convencional.....	77
20.	Comparación de la calidad de secado entre sistemas.....	78
21.	Resultados de gradientes de humedad por repetición y por sistemas de secado.....	79
22.	Ritmos de secado de la madera. Porcentaje de contenido de humedad por hora.....	80
23.	ANDEVA del ritmo de secado. De verde hasta el 30% de contenido de humedad.....	81
24.	ANDEVA del ritmo de secado. Desde 30% hasta el CH final alcanzado.....	81
25.	Contenidos de humedad y tiempo real de secado por sistema.....	88
26.	Comparación de tiempos de secado estimados por sistema.....	89
27.	Resultados de costos de secado al aire libre por unidad de volúmen.....	93
28.	Resultados de costos de secado solar por unidad de volúmen.....	97
29.	Resultados de costos de secado convencional por unidad de volúmen.....	102
30.	Comparación de costos de secado por sistema por m ³ y pie-tabla en los tres sistemas.....	103
31.	Costo de la madera seca y su relación beneficio-costo.....	103

INDICE DE FIGURAS.

FIGURA	TÍTULO	PÁG.
1.	Arbolado de encino en el lugar de colecta.....	33
2.	Trocería de encino en el lugar de experimentación.....	34
3.	Defectos de secado: a:arqueadura,b:encorvadura,c:torcedura, d:acanaladura.....	38
4.	Obtención de las muestras de secado.....	40
5.	Ubicación de las muestras en las pilas del secado al aire libre.....	41
6.	Obtención de muestras para evaluación del gradiente de humedad.....	44
7.	Pilas para el secado al aire libre.....	46
8.	Ubicación de las muestras en las pilas del secado solar.....	48
9.	Proceso de secado en secador solar.....	49
10.	Ubicación de las muestras en las pilas del secado convencional.....	51
11.	Probetas de esfuerzos de secado.....	54
12.	Muestras usadas para evaluar la presencia de apanalamiento en los tres sistemas de secado.....	79
13.	Ritmos de secado desde verde al 30% de CH en los tres sistemas. Pérdida de humedad por hora.....	82
14.	Ritmos de secado desde el 30% al CH final alcanzado en los tres sistemas. Pérdida de humedad por hora.....	82

15.	Curvas promedio y curvas por repetición de secado de la madera al aire libre.....	84
16.	Curvas de secado de la madera en secador solar.....	85
17.	Curva promedio y curvas por repetición de secado de la madera en secador convencional.....	87
18.	Curvas equivalentes de secado en los tres sistemas.....	89

RESUMEN

El trabajo consistió en secar madera de encino bajo tres sistemas de secado: al aire libre, solar y convencional, así como realizar una comparación entre ellos, en función de la calidad, tiempo y costos de secado a fin de determinar la factibilidad técnica del uso de secadores solares. Para evaluar la calidad de madera seca, se utilizó la Norma Chilena NCh.178.Of.79 (Instituto Nacional de Normalización, 1979) y la calificación dada por Kauman y Mittak (1966); para evaluar los tiempos de secado, se utilizaron modelos matemáticos para estandarizar los contenidos de humedad entre repeticiones y entre tratamientos; Para evaluar los costos de secado, se empleó la metodología propuesta por La Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1989).

Los resultados obtenidos mostraron que la calidad de la madera de encino secada en secador solar, es similar a la obtenida en estufa convencional y mejor a la que se puede obtener al aire libre. El mayor tiempo de secado se obtuvo al aire libre (128 días) medio en el secado solar (38.5 días) y menor en el secado convencional (9.7 días). Sin embargo, los costos de secado más altos por pie-tabla fueron en el sistema convencional(\$1.87) y los más bajos en el secado solar y al aire libre(\$1.16), que a nivel comercial se consideran aceptables.

SUMMARY

An experiment consisted in drying oak lumber under three kinds of drying systems: air-drying, solar kiln drying and kiln drying. A comparison among the three drying systems was also carried out by taking into account drying quality, drying time and drying costs in order to determinate the technical feasibility of solar kiln driers. The Chilean Standard NCh.178.Of.79 (Standards National Institute, 1979) was used to evaluate the quality of dried lumber, as well as the grading system given by Kauman and Mittak(1966). Mathematical models were used to evaluate drying times by means of standardising the wood moisture content among both trials and treatments. Drying costs were evaluated by a methodology proposed by the Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1989).

The results showed that oak lumber quality obtained in solar kiln drying was similar to that obtained in kiln drying, and much better that obtained in air drying. The longest drying time was for air drying (128 days), followed by solar kiln drying (38.5 days) and then by kiln drying (9.7 days). However, the highest drying cost per board feet was obtained in kiln drying (\$1.87) and the lowest in solar kiln and air kiln drying (\$1.16). These costs are considered acceptable at a commercial level.

1. INTRODUCCIÓN.

El género *Quercus* es el segundo en cuanto a la abundancia y distribución de sus especies en México. Está clasificado en tres grandes grupos, cuyas diferencias se acentúan ante los procesos tecnológicos a que se someten: encinos blancos, rojos y negros (Martínez, 1981).

Taxonómicamente, se reconocen de 150-200 especies que en más de la mitad, son árboles dominantes o codominantes en bosques asociados de pino-encino o en masas puras. Su altura varía desde pequeños arbustos hasta árboles que alcanzan los 50 metros. Cubren a nivel nacional, una superficie de 24.2 millones de hectáreas que representan el 5.5% de la superficie del país. Los encinos son actualmente un recurso subutilizado ya que sus aprovechamientos industriales son muy reducidos; los usos mayoritarios a que se destina su madera son productos de poco valor agregado como celulósicos, leña y carbón, y en cantidades menores, se destina a la elaboración de muebles, lambrín, duela y parquet (Rzedowski, 1978).

Las especies de encino se consideran entre las maderas duras de mayor importancia, sin embargo, el mayor y mejor aprovechamiento de su madera requiere mayores conocimientos tecnológicos para su procesamiento; específicamente, sobre aquellos considerados como cuellos de botella en la industrialización.

Uno de los problemas más relevantes para la utilización de la madera de encinos, es el secado. La heterogeneidad de su estructura anatómica y sus contracciones altas causan

diferentes defectos, por lo cual requiere de un secado lento y cuidadoso, durante el frecuentemente se presentan alabeos y rajaduras difíciles de controlar, además de una alta susceptibilidad al colapso y al apanamiento que demeritan su calidad, originando considerables pérdidas tanto en la calidad de la madera como económicas.

Por otra parte, además de los sistemas tradicionales que se utilizan para secar la madera, como son el secado al aire libre y en estufas convencionales, existe una nueva alternativa de secado que se ha incrementado y fomentado en los últimos años. Esta alternativa es el uso de secadores solares para madera. Los pocos trabajos experimentales han demostrado que el tiempo de secado se reduce en comparación con el secado al aire libre y el costo de operación es considerablemente menor que con el secado en estufas convencionales Peck (1962), Chudnoff *et al.* (1966), Lumley y Choong (1979), Yang (1980), Martínez *et al.* (1984) y Chen y Helton (1989).

Los secadores solares parten del principio de aprovechar la energía proveniente del sol, captarla y emplearla en el secado de maderas, y considerando que la mayor parte del sector dedicado a la transformación de la madera está formado por pequeñas empresas y artesanos con un bajo nivel de producción, el uso de secadores solares de pequeña capacidad representa una buena opción, dado que la inversión inicial que se requiere en la adquisición del equipo representa apenas el 10% del costo de una estufa convencional (Martínez, *et al.* 1984).

Respecto a la calidad del secado solar, los reportes son limitados y la información existente es principalmente sobre coníferas.

Con la finalidad de fomentar el aprovechamiento industrial de la madera de encino, determinar la factibilidad del uso de secadores solares para reducir el contenido de humedad de la madera, y contribuir al conocimiento tecnológico de la especie, se plantea el presente estudio.

2. OBJETIVOS.

a).- General.

Evaluar y comparar la calidad, tiempo y costos del secado de la madera de encinos, mediante los sistemas de secado al aire libre, en secador solar y en secador convencional.

b).- Específico.

Determinar la factibilidad técnica del uso de secadores solares para el secado de madera de encino.

3. ANTECEDENTES.

A nivel nacional los estudios sobre secado de madera de encino, se han realizado principalmente por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, por el Instituto de Ecología A.C. y el Instituto de Madera Celulosa y Papel. Sin embargo, existen diversos estudios a nivel internacional relacionados con los tres sistemas de secado que se consideran en el presente trabajo.

3.1 SECADO AL AIRE LIBRE.

Wengert (1971) considera que una ventaja de secado de madera al aire libre con respecto a otros procesos, es su bajo costo inicial, así como el importante y considerable ahorro de energía que se tiene al remover cada por ciento de humedad, ya que si se compara con el secado convencional, esto significa un ahorro de 2.5 a 4.25 millones de BTU (2.64-4.75 millones de KJoules) por cada 1% de humedad que se pierde al secar al aire libre.

McMillen y Wengert (1978) mencionan que las limitaciones del secado al aire están asociadas con la naturaleza incontrolable del clima en lo que dura el proceso, ya que requiere períodos de tiempo prolongados, tornándose más lento durante los meses más fríos. También ocurre que por influencia del sol o el viento y una baja humedad relativa, la superficie de las

tablas se secan más rápido que la zona interna, provocando así la presencia de rajaduras y grietas.

Estos mismos autores, presentan una tabla de estimación de tiempos de secado al aire por regiones de EE.UU., desde verde hasta un 20% de contenido de humedad promedio. Para encino rojo, en la región Sur, estiman que requiere de 60 a 120 días para 1" y de 240 a 360 días, para 2". En la Región Media Sur estiman un tiempo de 55 a 100 días para 1" y de 215 a 300 días para 2" de espesor en la misma especie. Del mismo modo, en la Región Central estos tiempos van de 50 a 90 y de 190 a 250 días para 1" y 2" respectivamente, y finalmente, para la Región Media Norte solo presentan tiempos de 60 a 165 días para 1" de espesor.

Denig y Wengert (1982), en un estudio realizado en Estados Unidos, utilizaron madera de *Liriodendron tulipifera* y de encino rojo para estimar la pérdida de humedad diaria en condiciones ambientales, la velocidad de secado se relacionó con las variables obtenidas de la estación meteorológica de la región encontrando que la pérdida de humedad diaria de encino y *Liriodendron* puede estimarse con seguridad conociendo el contenido de humedad inicial (CH), el promedio de humedad relativa (HR) y la temperatura (Temp). La ecuación utilizada para encinos de 4/4" en la estimación de los cálculos de contenido de humedad diarios fue la siguiente:

$$\text{Pérdida de humedad} = 0.27 + 0.00071 (\text{CH}^2) + 0.025 (\text{temp}) - 0.031 (\text{H.R})$$

Los autores mencionan que usando esta ecuación y el historial meteorológico mensual, se puede desarrollar un calendario de secado al aire para la especie de interés.

Rodríguez , Fuentes y Montes (1989) señalan que el secado al aire libre tiene sus limitaciones mayores para secar madera de calidad con bajos contenidos de humedad, debido a que no se tiene un control absoluto de las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura y velocidad de aire) originando con ello, defectos en la madera y como consecuencia, una merma considerable en los volúmenes de madera aprovechable.

Estos mismos autores señalan que el secado al aire por abajo de un contenido de humedad óptimo (18%), tiene un costo excesivo. Los dos costos mayores de este sistema son el de mantener la madera en inventario y la degradación por la pérdida de calidad. Los costos de inventario aumentan al disminuir la velocidad de secado y los costos por degradación aumentan cuando la madera se rehúmedece por la lluvia, y se expone al intemperismo.

3.2 SECADO EN SECADOR SOLAR.

Un secador solar, es una combinación del secado en estufa y al aire libre, que emplea una fuente de energía inagotable (energía solar) y libre de contaminación. Sin embargo, su éxito está restringido a áreas con alta radiación solar, favoreciendo el secado durante el verano y al inicio de otoño.

Chen (1981) menciona que los secadores solares se experimentaron en otros países desde hace 40 años aproximadamente. Actualmente, la reciente escasez y los costos muy altos de combustible, han renovado el interés por la industria forestal a buscar fuentes de energía alternativa, usando la energía solar para el secado especialmente de maderas duras ya que consumen del 60-70% de la energía total empleada en el proceso. En algunas ciudades de Estados Unidos de clima tropical, donde los costos de combustible son extremadamente altos, el Laboratorio de Productos Forestales (FPL) ha realizado investigaciones, diseñado y probado diversos prototipos de secadores solares, obteniendo resultados favorables en la mayoría de los casos.

Maldonado y Peck (1962) comentan que el secado solar es un sistema que opera bajo el principio de "invernadero" para generar condiciones más cálidas en el interior de la cámara, y conseguir un secado más rápido, alcanzándose contenidos de humedad del 12% en menos de la mitad del tiempo requerido en el secado al aire libre y de obtener mejor calidad de madera con un costo de inversión relativamente bajo.

Ellos reportan que el Laboratorio de Productos Forestales de los Estados Unidos en cooperación con "E.I. Dupont of Nemours and Company", diseñaron y construyeron un secador solar en Puerto Rico con capacidad para secar 2000 pies tabla, con un costo aproximado a 2,000 \$US Dls. En este secador se llevó a cabo el secado de madera de caoba de 5/4" de espesor y anchos variables, desde el 50% hasta el 12% de contenido de humedad. El

tiempo de secado fue de 23 días, presentándose rajaduras y grietas mínimas en los extremos de las tablas.

Una segunda prueba con la misma especie en 4/4" de espesor, se secó en 35 días, de diciembre 15 a enero 18 desde un 32% de contenido de humedad inicial hasta un 12% de humedad final. Los autores consideran que aún en los meses de invierno, el secado solar es mucho más corto comparado con el secado al aire libre y los contenidos de humedad que se alcanzan también son bajos.

Peck (1962) experimentó con un secador experimental tipo invernadero construido en Madison, Wisconsin. En este estudio se secaron tres cargas de encino rojo de 4/4" de espesor de verde al 20 % de contenido de humedad, en poco menos de la mitad del tiempo requerido para secar la misma madera al aire libre. Los tiempos de secado fueron de 86 días en mayo y 173 días en noviembre mientras que en el secador solar fueron de 23 y 105 días respectivamente. El autor comenta que esta reducción en promedio, puede conservarse para cualquier mes del año. Con respecto a la calidad, ésta fue ligeramente mejor en el secado solar que al aire libre.

Chudnoff, Maldonado y Goytía (1966) en Río Piedras, Puerto Rico, utilizaron un secador solar para determinar el tiempo de secado de 7 cargas de caoba hondureña de varios espesores de 50% de humedad inicial al 12% de humedad final y una carga con mezcla de 11 especies de maderas duras a partir de un CH inicial de 60% al 12% de CH final. La caoba de

4/4" de espesor se secó en 18 días, la de 1 1/4" se secó en 25 días y en 48 la de 2" de espesor. La mezcla de especies refractarias con rango de densidad básica de 0.48 a 0.82 gr/cm³ requirió de 43 días, y los defectos de torceduras y rajaduras fueron menos severos que al aire libre. Concluyen que para secar a CH finales del 15%, el tiempo se reduce de 1/2 a 1/4 del tiempo necesario para secar al aire libre.

Troxell y Mueller (1968) reportan que en las montañas rocallosas (Rocky Mountain) y al Sureste del mismo lugar, se llevó a cabo un experimento de secado solar para maderas suaves. En este sitio, las condiciones climáticas son favorables durante la mayoría de los años y la madera puede secarse rápidamente. La región se caracteriza por una abundancia de días soleados y baja humedad relativa con mucho movimiento de aire por 6 - 9 meses. El experimento consistió en secar una mezcla de madera de Engelmann spruce (*Picea engelmanni*) de 3/4" y Lodgepole pine (*Pinus contorta*) de 4/4" de espesor.

El tiempo de secado para la mezcla durante el mes de agosto a un CH inicial promedio de 60% hasta el 19% final, fue igual tanto para el secado solar como para el secado al aire (3 días). En cambio, hasta un CH de 12%, el tiempo requerido fue de 6 y 9 días, respectivamente. Sin embargo, durante los meses de diciembre a enero, con un CH inicial de 65% hasta CH promedios finales de 19 y 12%, el secado solar requirió de 16 y 25 días, respectivamente, en comparación con el secado al aire, que requirió 25 y más de 33 días para alcanzar el contenido de humedad en equilibrio, que generalmente es mayor al 12%.

Las grietas fueron más notables en el secado solar, sin embargo, esto ocurrió solo en el 2.6% de las tablas comparadas con el 0.8% del secado al aire libre. En el secado solar, la encorvadura, fue el defecto más común, seguido por torcedura. En el secado al aire, el más común fue el arqueamiento; en ambos métodos, el acanalamiento fue severo con ligero endurecimiento superficial.

Bois (1977) reporta que al Sur de Wisconsin (EE.UU.), a una latitud de 43°N se secó madera de diferentes especies en un secador solar: black cherry (cerezo negro), black walnut (nogal), white oak (encino blanco) y cotton wood (*Populus sp.*). El encino blanco de 4/4" de espesor se secó desde un 15.5% de CH promedio hasta un 7.7% de CH final, en un tiempo de 52 días durante julio-agosto, mientras que en el mismo período de tiempo, con el mismo espesor, se secó el cerezo desde un 60% de contenido de humedad inicial promedio hasta un 6% de CH final. En verano, un estudio con madera de *populus sp.* de 2 x 4" y nogal de 4/4" a un CH inicial promedio de 130% y 85%, alcanzaron un CH promedio final de 10% y 12%, respectivamente, en 47 días con un excelente secado sin presencia de defectos.

Mc Millen y Wengert (1978) reportan que el secado solar reduce considerablemente el tiempo en un 50 a 75% y el contenido de humedad final puede ser en maderas duras hasta menor a un 10% comparativamente con el secado al aire. Los mismos autores comentan que en diversos países del mundo, se han realizado otras investigaciones adicionales sobre secadores solares usando variaciones del equipo, desde muy pequeños gabinetes en la India hasta las unidades semicomerciales con capacidad cercana a los 3,000 pt en Uganda.

Robertson y Mc Cormick (1978) reportan la construcción de un sistema de secado solar, el cual provee el 40% de la energía requerida para secar 50 millares de pies tabla de maderas duras (*Quercus alba L.*). El sistema cuenta con una superficie de 2500 pies cuadrados de cámara de colector líquido y 2400 pies cuadrados de área de reflector en aluminio, con un arreglo similar a los dientes de una sierra. El almacén del agua tiene capacidad para 5000 galones, el agua circula a través del colector y permite el intercambio de calor. El sistema fue construido por J.A. La Cour, de Servicio de Hornos de secado en Canton, Mississippi (EE.UU).

Ellos mencionan que los requerimientos de calor para el diseño fue estimado con base en el tiempo de secado y la temperatura del secador, de manera que una carga que entra con un contenido de humedad inicial de 40% y sale con un contenido de humedad de 6%, se seca en 19 días. En este tiempo, el suministro de energía requerido fue de 5600 BTU/h/1000 (5908 J/h/1000) pies-tabla basado en el promedio de requerimientos de 2500 BTU/libra (2638 J/Kg) de agua que remueve la madera y un peso seco de 3000 libras/1000 Pt.

Lumley y Choong (1979) reportan los resultados del estudio que se llevó a cabo en la Universidad Estatal de Louisiana (EE.UU.) sobre el secado solar de 7 cargas de madera de diferentes especies, entre ellas encino rojo de 6/4", mismas que se compararon con el secado al aire libre. La evaluación de calidad la realizaron por defectos de secado presentados. No hubo medición de defectos previos al secado y se realizó un análisis de varianza que indicó la relación significativa estadísticamente de las grietas y rajaduras con la ubicación de la médula.

El endurecimiento superficial fue ligero y se atribuye a los esfuerzos desarrollados, como resultado de las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa durante el proceso de secado.

De este estudio, el tiempo de secado para encino desde 84% de contenido de humedad inicial hasta un 20% de contenido de humedad final fue de 25 días. Esto es un tercio del tiempo de secado al aire libre, en el cual se requirieron 104 días para el mismo contenido de humedad.

Los mismos autores reportan que el costo del secado solar, fue de 1.25 \$US Dls. por pie tabla (considerándose 0.55 \$US Dls. en material y 0.70 \$US Dls. por mano de obra), que significan la mitad del costo del secado convencional 2.50 \$US Dls.¹ (\$19.25 pesos) por pie-tabla, para una capacidad de 25 millares de pies tabla. A un mismo nivel de producción, la inversión que requiere el secado convencional, con respecto al solar es igual, solo que el ahorro económico se tiene básicamente en el precio del combustible y poco en el tiempo de operación de los ventiladores. En general, los resultados del secado que ellos obtuvieron mostraron que el secado solar es técnicamente un método para secar maderas duras en Louisiana, ya que pueden alcanzar bajos contenidos de humedad en tiempos menores que al aire libre.

Plumptre (1979) en el Colegio de Magdalena, Oxford, con un secador solar de tipo "oxford", secó madera de encino de 2" de espesor durante el verano de 1976, de un CH inicial del 40% al 10-12% de CH final en 4 meses. De junio a octubre de 1977, de un CH inicial de 60-100% al 12-14% de humedad final se llevó un tiempo de secado de 5 meses,

¹ cotización de 1 dólar al 28 de Julio de 1996 (\$7.70 pesos)

comparativamente, el tiempo de secado al aire libre en ésta época es de 6 meses y de 1.5 meses en secador convencional.

La calidad de secado solar obtenida fue muy buena con pequeñas o casi invisibles rajaduras superficiales y ligeras distorsiones, que puede compararse muy bien con el mejor secado comercial en secador convencional. El costo del secador es de aproximadamente 1/10 del costo de un secador convencional prefabricado de la misma capacidad, variando únicamente los costos de construcción y operación en función de la mano de obra utilizada. Los costos unitarios por pie tabla de madera seca, resultan de 1.71 libras esterlinas/pie³ (1.67 libras esterlinas por pie-tabla).

Las ventajas de este tipo de secadores solares son la calidad de secado que se obtiene particularmente con maderas difíciles o lentas de secar, su bajo costo de operación, la simplicidad en la construcción y que presentan un considerable ahorro de energía.

Yang (1980) reporta los resultados obtenidos en un secador solar con capacidad para secar 1.18 m³ de madera de pino, ubicado en el Campo Universitario de Lakehead, Canadá, durante el verano e invierno a una latitud de 48°N. Para secar de verde al 10% de CH final se requieren de 30 días en agosto y de 140 días en los meses de invierno, mientras que al aire libre, a partir de un 60% de CH inicial al 19% de humedad final el tiempo de duración de secado fue de 230 días de noviembre a junio y de 243 días durante el invierno.

El autor comenta que para determinar el porcentaje de rajaduras en los extremos, la evaluación se basó en el número de piezas con rajaduras visibles. Observó que las rajaduras en el secado solar durante el invierno, fueron más bajas que al aire libre, en donde el alto porcentaje fue ocasionado por las fluctuaciones de temperatura y humedad relativa del ambiente. En el secador solar, el número de tablas con rajaduras en los extremos fue mayor en el verano que en el invierno, esto se atribuyó a las altas temperaturas promedio alcanzadas (49.3°C) y a los períodos cortos de secado. De este estudio concluyó que la calidad de secado solar es superior al secado al aire y que en él pueden obtenerse CH finales más bajos en tiempos menores.

Chen (1981) reporta los resultados que se obtuvieron al Sur de Illinois (EE.UU.) al secar madera de yellow poplar (tulipero de Virginia) hasta un 15% de CH durante todo el año, encontrando que el tiempo requerido fue menor que al aire libre.

Menciona que el secado solar fue más efectivo en el verano y a principios de otoño, cuando la eficiencia del secador fue de 90 y 67%, respectivamente. Comparado con el secado al aire libre, el tiempo fue de 2 a 3 1/2 veces más rápido. La calidad en ambos sistemas fue muy buena, no encontrándose diferencias en promedio de las contracciones y agrietamiento, sin embargo, en toda la madera secada al aire libre, se desarrollaron rajaduras en los extremos durante el secado mientras que en el secador solar, solo el 54% de las tablas las presentaron. El secado solar fue menos efectivo en el invierno, cuando la eficiencia se redujo a un 29%.

Oliveira, Skaar y Wengert (1982) en el Instituto Politécnico de Virginia y el Campo Universitario Estatal (State University Campus), secaron madera de encino de 4/4" de espesor durante el invierno en un secador solar y al aire libre, con un contenido de humedad inicial promedio de 82% y 79%, respectivamente. La madera alcanzó el 20% de contenido de humedad en 80 días y el 6% en 125 días en el secador solar. En el secado al aire, el 20 % de contenido de humedad se alcanzó en 105 días y el 14% en 162 días. El secado solar hasta el 6% de contenido de humedad no presentó rajaduras en los extremos y estuvo libre de esfuerzos internos, mientras que al aire, estos defectos fueron muy notorios.

Al comparar la velocidad de secado de encino verde usando energía solar (secador solar), los autores encontraron que fue un 50% más rápido que al aire libre, y la temperatura en el interior del secador fue consistentemente más alta que en el exterior durante diciembre 23 a abril 13, registrándose de 133 °F en el interior y de 74 °F en el exterior.

Little (1984) reporta el funcionamiento de un secador solar construido por La Cour, con capacidad para operar comercialmente 50 millares de pt. En él se secó madera de *Quercus alba* L. de 4/4" de espesor, la temperatura del bulbo seco durante el secado fue de 95 °F y de 92 °F para el bulbo húmedo, llegando a un contenido de humedad en equilibrio de 17.5% de 7 a 8 semanas. El costo de combustible de éste experimento, estimó que tuvo un ahorro de 1000.00 \$US Dls.

Martínez, Pinillos y Cueto (1984) mencionan que el uso de energía solar en el secado de la madera es muy ventajoso, ya que comparado con el secado al aire libre, disminuye tanto el tiempo del proceso como el contenido de humedad final.

Estos mismos autores reportan el diseño y construcción de un prototipo de secador solar en el Instituto de Ecología, en Jalapa, Veracruz, en el que, para probar su eficiencia, se realizaron pruebas de secado con madera de pino de 4/4" de espesor con un contenido de humedad inicial de 85%. La zona presenta una humedad relativa anual promedio de 86% con 156 días de lluvia al año con baja insolación. Los resultados se compararon con el secado al aire libre, encontrando que en tiempos iguales en el secador solar la madera alcanzó un contenido de humedad de 11%, mientras que al aire libre apenas fue del 21% de humedad. La calidad fue considerablemente mejor que al aire libre pues no se presentaron grietas ni otro tipo de deformaciones. En relación a los costos por pie tabla de madera seca, se hizo una comparación de los tres sistemas de secado, correspondiendo el costo más alto al secado convencional y el más bajo al secado al aire libre.

Simpson y Tschernitz (1984) mencionan que un secador solar localizado en Yezin, Burma, con capacidad para secar 2.4 m³ de madera aserrada incorporó un sistema de control, el cual cumple con tres objetivos principales: 1.- tiene bajo costo en el mercado, es durable y de disponibilidad rápida; 2.- sigue programas de secado controlando la temperatura y la humedad relativa para minimizar los defectos y maximizar la velocidad de secado y 3.- tiene integrado un control automático de operación. Al probarlo se encontró que puede secar madera

rápidamente a un bajo contenido de humedad final y con menores defectos que el secado al aire libre.

Corvalán (1985) menciona que el aprovechamiento de la energía solar en el proceso de secado de madera puede ser importante, y en especial para los países en vías de desarrollo que poseen grandes riquezas forestales con limitadas posibilidades de exportación por no disponer de técnicas de bajo costo, que garantice al mismo tiempo la calidad de la madera. Este autor, secó madera de *Pinus radiata* de 15 cm x 7.5 cm x 2.20 m en los meses de junio y julio en Madrid, España, teniendo un tiempo efectivo de secado de 55 días hasta alcanzar un gradiente de humedad pequeño. En términos de economía, menciona que la inversión inicial requerida para un secador solar es inferior o, a lo sumo, igual al de las técnicas convencionales de igual capacidad, con tiempos de amortización reducidos.

Kunze y Hermosillo (1985) observaron el comportamiento de un secador solar ubicado en la sierra Huichola al Norte de Jalisco México, al secar madera de pino de 5/4"- 6/4" de espesor. El tiempo de secado fue de 12 días a partir de una humedad inicial aproximada a 80% hasta un contenido de humedad final de 10% y la calidad que obtuvieron fue satisfactoria. Durante el funcionamiento del secador, observaron que la mayor parte del secado se dio entre las 14 y 20 horas del día. Concluyen que el hacer uso de la energía solar significa secar con relativa rapidez, tener tecnología simple y que resulta económicamente rentable.

Harpole (1988) presenta dos ecuaciones para estimar la máxima inversión económica (MIE) y los requerimientos de capital de trabajo (RCT) en un sistema de secado solar de bajo costo con capacidad para 6 - 9.6 millares de pies tabla (Mpt). La máxima inversión económica por facilidad, fue estimada por diferencias en el valor capitalizado de la madera verde y el costo de secarla.

En el mercado, la madera verde de encino No. 1 común de 4/4" tuvo un costo de 504.00 \$US Dls. por millar de pies-tabla y parcialmente seca al aire de 550.00 \$US Dls. por millar de pies tabla. Aplicando las ecuaciones propuestas, en 1987 el costo total de la madera seca calculado en el secador solar fue de 642.00 \$US Dls. por Mpt (\$4.94 pesos/ pie tabla de madera seca), con un costo total de secado de 138.00 \$US Dls. por Mpt lo que equivale a un costo de secado aproximado de \$1.06 pesos por pt.

$$MIE = Ccs \{ [(Vu - 5) * 0.025] + 1 \} * [1,364 (Qs/Ts) - 738]$$

$$RCT = Ccs * [222 + 0.0118 (Qmv) * (Ts)]$$

Donde:

Ccs = Capacidad de carga del secador solar. Vu = Vida útil del secador.

Qs = Costo del secador. Ts = Tiempo de secado en días y Qmv = Costo de la madera verde.

Chen y Helton (1989) en la Universidad Austral de Illinois (EE.UU.), secaron madera de encino de 4/4" de espesor con anchos variables en 4, 5 y 6" con 8 pies de longitud, en un secador solar durante el invierno y verano de 1986. La evaluación de calidad de madera se

realizó con base en la intensidad de defectos, considerando acanaladuras, torceduras, arqueaduras, colapso, rajaduras y grietas. Obtuvieron una calidad de madera seca excelente, con esfuerzos de secado moderados y defectos mínimos. El tiempo de secado de verde al 8% de CH durante el invierno y verano fue de 91 y 60 días, respectivamente, registrándose una mayor velocidad de secado en el verano que en el invierno.

Los mismos autores reportan que la calidad de secado fue excelente y los esfuerzos fueron moderados. De 295 tablas que se secaron, sólo 3 mostraron rajaduras superficiales y una de las tres mostró rajaduras en los extremos. Considera que la pérdida de calidad fue de 4.12 dólares por millar de pies-tabla.

Rodríguez, Fuentes y Montes (1989) mencionan que la evaluación de un proceso de secado se hace generalmente, en función del tiempo requerido y de los defectos que se originen a causa del tratamiento a que se somete la madera. El tiempo de secado depende de factores como: especie, densidad, espesor, contenidos de humedad inicial y final y las condiciones climáticas.

Reportan que en el Instituto de Madera, Celulosa y Papel de la Universidad de Guadalajara, se construyó un secador solar para maderas duras de 1200 pies tabla de capacidad y 10.45 m² de área de colector, para probarlo, se realizó un estudio sobre el comportamiento de las maderas de encino (*Quercus sp*) de 2" de espesor, de coco (*Cocus nucifera*) de 2" de

espesor y pino (*Pinus sp*) de 2" de espesor, cuyos resultados se compararon con el secado al aire libre y en estufa convencional.

Ellos observaron que el secado solar para encino se llevó un tiempo aproximado a 2 meses (enero-marzo) desde el 40% de contenido de humedad inicial hasta un contenido de humedad del 12% no presentando grietas ni alabeos. Para el secado al aire libre de *Quercus sp.* con el 42% de humedad inicial, el tiempo fue aproximadamente 4 meses de abril a julio y no fue posible reducirlo por abajo del 20%, mostrando agrietamientos, alabeos y colapso significativamente. En el secado convencional, el tiempo requerido fue de 45 días desde un 45% de contenido de humedad aproximado hasta un 10% de humedad final, lo cuál incrementó el consumo y costos de energía y por consiguiente el del proceso.

Las conclusiones finales de los autores fueron: 1. El uso del secador solar para maderas, permite secar tanto maderas de coníferas como de latifoliadas con tiempos aceptables y sin altos riesgos de agrietamientos, alabeos o colapsos, a la vez que combinado con el técnico convencional, permite reducir el costo de operación del secado de maderas duras hasta en un 50%. 2. La infraestructura económica es más barata que el sistema convencional. 3. Los tiempos de secado son más cortos que al aire libre. y 4. Es un sistema apropiado para zonas donde los energéticos resultan muy caros con poca viabilidad.

Alvarez y Fernández-Golfin (1990) estudiaron en el Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y el Departamento de Industrias Forestales de Madrid,

España, la eficiencia de un secador solar, cuyos resultados fueron comparados con el secado al aire. Realizaron 10 pruebas con cuatro diferentes especies: *Quercus sp.*, *Platanus hibrida* , *Eucalyptus sp.* y *Pinus radiata* en 4 diferentes espesores: 25, 27, 30 y 55 mm. Evaluaron los siguientes criterios: tiempo de secado, contenidos de humedad final, calidad de secado, requerimientos de energía, condiciones de temperatura y humedad relativa en el interior y exterior del secador solar y la eficiencia del proceso de secado.

La madera de encino, con 30 mm de espesor desde 80% de contenido de humedad inicial hasta un 10% de humedad final, se secó en 68 días que comparado con el secado al aire de 78% de humedad inicial hasta un 11% de humedad final, tardó 170 días en secarse durante los meses de marzo a agosto. La calidad de secado solar resultó mejor que la obtenida en el secado al aire y puede ser comparable y con frecuencia mayor que la que se obtiene por métodos convencionales, presentando una eficiencia calculada de 22%.

La eficiencia del secado solar fue 3 veces mayor en el verano que en el invierno y de 1.6 veces mayor para espesores de 30 mm que para 55 mm. El consumo de energía (Kw-h/Kg. de agua evaporada) fue solamente aproximada a una décima parte de lo que se usa con métodos convencionales, ya que la eficiencia del secador solar depende fuertemente de las condiciones ambientales y principalmente de la intensidad de la radiación solar colectada.

Steinman y Vermaas (1990) reportan que la temperatura más alta que se alcanza en un secador solar está por abajo de la máxima que se asigna en un programa de secado

convencional. Dado que el contenido de humedad en equilibrio (CHE) cambia con la temperatura, la cual en este sistema no puede controlarse y varía significativamente de día a noche y también de día a día, el CHE en un secador solar requiere de monitoreos continuos y de realizar actividades que lo regulen para conseguir un secado óptimo.

El sol como única fuente de energía no está disponible como para compensar una pérdida de energía producida por un deficiente control del CHE, para hacer el mejor uso posible de ella, se investigaron varios parámetros de control en un secador totalmente automatizado, el cual se cargó con madera de *Pinus radiata* de 38 x 15.2 x 215 cm y se encontró que la proporción de abertura y control de ventilación fueron los de mayor importancia, requiriéndose al final del proceso un poco del rociador. La proporción de abertura requerida depende de varios factores tales como el CH de la madera, la especie, las dimensiones y las condiciones de secado.

Los autores mencionan que la importancia del control de ventilas en el secador solar se basa en la humedad que entra cuando el CHE del interior del secador se excede y la humedad absoluta exterior es mucho más alta que la humedad absoluta interna, asimismo, un sistema de ventilación adecuado debe ser capaz de manejar grandes volúmenes de aire en las primeras etapas del secado y controlar pequeños volúmenes de aire al final del proceso, utilizando un rociador para asegurar un sistema de control de alta sensibilidad y prevenir la sobreventilación.

Ellos concluyeron que: 1). El control del CHE es necesario para proteger la madera y mantener una velocidad óptima de secado así como para prevenir la pérdida de energía a través del uso de ventilas. 2). La velocidad de secado tuvo un rango muy amplio en las diferentes estaciones. Para controlar los extremos de las piezas, se requirió de ventilas grandes y un sistema de control del CHE sensible y efectivo. 3). Puede seguirse un programa de secado específico sólo si se conoce en todo momento el correcto contenido de humedad de la madera.

Ochoa (1991) reporta un estudio desarrollado en el Centro Industrial Magallanes, en Michoacán, donde se construyó un secador solar con capacidad para 10,000 pies tabla aproximadamente. Estima que su costo de construcción con relación a los equipos de importación, representan una décima parte. Los resultados obtenidos con el secador fueron satisfactorios, principalmente con madera de encino, que a contenidos de humedad inicial de 60%, se lograron contenidos de humedad promedio finales del 12%. Con maderas presecadas al 28% de humedad, se obtuvieron contenidos de humedad finales del 10% en un tiempo efectivo de secado de 28 y 22 días, respectivamente.

Las deformaciones y rajaduras fueron mínimas, con pérdidas promedio que representaron el 5% del volumen total de madera por carga de secado. Las pilas fueron tensadas con cable de acero que fue ajustándose a lo largo del secado, conforme fue disminuyendo el contenido de humedad de la carga.

La adaptación de este tipo de secadores solares, por su costo y buenos resultados de su funcionamiento, puede ser la alternativa de las pequeñas industrias forestales para la fabricación de productos de buena calidad con un mayor valor en el mercado.

3.3. SECADO EN SECADOR CONVENCIONAL.

Un secador convencional, consiste en una cámara equipada con sistema de calefacción, humidificación, ventilación y un equipo de control y registro, lo cual permite aplicar y regular los factores que producen el secado de la madera. Dentro de los diferentes tipos de secadores, se clasifican como “convencionales” aquellos que permiten aplicar temperaturas desde 50 hasta 90°C.

Rasmussen (1961) menciona que las maderas que poseen rayos grandes, densidad alta y textura gruesa, como la de los encinos, requieren cuidados especiales durante la fase primaria del secado, con el fin de minimizar las rajaduras en la superficie y en los extremos. Los factores mas importantes que deben considerarse en el secado son: la humedad relativa, el gradiente de humedad de la madera y la temperatura. Para el secado en estufa, se hacen las siguientes recomendaciones: emplear humedades relativas altas al inicio del secado y en la etapa final, para eliminar el defecto del colapso; utilizar un reacondicionamiento posterior con vapor saturado, con lo que se mejora, además, la calidad de las tablas.

Gaby (1963) menciona que las rajaduras superficiales de la madera son ocasionadas por los esfuerzos de secado, la severidad de éstas varía entre especies pero en maderas refractarias es particularmente más alta, como es el caso del encino que contiene arriba del 32% de su volumen como tejido radial. Considera que cualquier tratamiento previo al secado reducirá considerablemente las rajaduras superficiales, lo cual conducirá a eficientar el programa de secado y mejorar la calidad de madera seca. El mismo autor reporta un estudio realizado con madera de encino en donde se planteó como objetivos determinar el efecto del asierre en la madera aserrada para el desarrollo de rajaduras superficiales y encontrar sus causas. Los resultados mostraron que en las tablas aserradas con sierra circular, tuvieron una incidencia mayor de rajaduras que aquellas aserradas en sierra banda, y éstas se rajaron más en comparación con tablas que fueron cepilladas en verde y posteriormente secadas. Estadísticamente, éstas diferencias fueron muy significativas.

Al examinar las capas superficiales de las tablas aserradas por ambos métodos, Gaby (1963) encontró que el aserrío causó muchos desgarres de los elementos y en especial en torno a los rayos de la madera. Concluyó que los desgarres y rajaduras subsecuentes fueron insignificantes en la superficie de las tablas cepilladas.

Mc Millen (1963) realizó estudios con madera de encino sobre los esfuerzos de secado, menciona que se desarrollan cuando las capas externas de una pieza de madera verde se secan por abajo del PSF sufriendo una contracción antes que el interior se contraiga, éstos esfuerzos

son influenciados por la temperatura y la humedad relativa (HR) del aire prevalecientes en el lugar donde se seca la madera.

El estudio consistió en determinar el comportamiento de los esfuerzos de secado en 10 diferentes capas del duramen de encino rojo de 2 x 7" de espesor, usando una temperatura de 110°F (43.3°C) y pequeñas reducciones en la HR a lo largo del proceso de secado hasta el CHE deseado. En las capas externas (1 y 10), se alcanzó muy pronto el máximo esfuerzo de tensión, al tiempo que todas las capas interiores excepto las 2 y 9, presentaron la misma intensidad de esfuerzos de compresión. A medida que el secado avanzó, el esfuerzo de tensión de las capas externas fue disminuyendo y el esfuerzo de compresión fue aumentando, alcanzado su máximo al 18 día de secado y permaneciendo así hasta que las capas externas estuvieron listas para pasar del esfuerzo de tensión al de compresión.

Las capas 3 y 8 cambiaron de compresión a tensión al 19 día de secado y poco tiempo después, también las capas 4 y 7 dándose posteriormente la conclusión de los esfuerzos invertidos, cuando las capas exteriores alcanzaron el máximo esfuerzo de compresión y las capas internas el máximo esfuerzo de tensión. Bajo estas condiciones de temperatura, los esfuerzos de tensión en las capas internas fueron considerablemente más pequeños que el máximo esfuerzo de tensión desarrollado en las capas externas.

Mc Millen (1963) menciona que la temperatura tiene un efecto significativo en el aumento de esfuerzos de compresión interna en el secado de maderas duras, el cuál incide en

una contracción de la madera. En tablas de encino rojo de 2" de espesor con un contenido de humedad de 30% o menor, a temperaturas de 140°F tiene una contracción de 1.3% mayor que a temperaturas de 95°F. Asimismo, señala que el esfuerzo de compresión es el más importante de considerar en la contracción, debido a que 6/10 de la sección transversal de una muestra de madera lo presentan mientras que el esfuerzo de tensión, tan sólo 2/10 lo presentan.

El mismo autor señala que el uso de altas temperaturas al final del secado, no tienen efectos en el proceso de secado si se mantiene al mínimo el esfuerzo de compresión, si por otro lado, se usan altas temperaturas iniciales, se presentará un mínimo de tensión y mucho esfuerzo de compresión, originando que el interior de la madera empiece a contraerse y a deformarse. En cualquier patrón de humedad relativa, la temperatura parece tener poco efecto en el aumento o el número de zonas con esfuerzos de tensión, la excepción se presenta cuando la temperatura es inferior a 90°F.

Díaz (1977) reporta que en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, se probaron 49 programas de secado en estufa convencional para madera; de éstos, 18 para coníferas y 31 para latifoliadas y entre ellas, *Quercus laurina*, *Q. sideroxyla*, *Q. falcata*, *Q. kelloggii* y *Quercus sp.*

Tschernitz y Simpson (1979) reportan un estudio experimental desarrollado en Madison, EE.UU., sobre secado con madera de encino de 2.9 cm de espesor, con un contenido

de humedad inicial y final de 84% y 9%, respectivamente, requirió de un tiempo para su secado de 24 días, obteniendo buena calidad.

Los resultados de este estudio fueron comparados a su vez con el secado solar y al aire libre, encontrándose las siguientes diferencias: A partir del mismo contenido de humedad inicial y espesor de las tablas, para llevar la madera hasta un 9% de humedad en el secador solar se necesitaron 54 días con un nivel de calidad bueno, en tanto que en el secado al aire a este mismo tiempo, se alcanzó apenas el 20% de contenido de humedad.

Morales (1980) analiza la factibilidad económica de la instalación de una unidad de secado artificial en el aserradero Vista Alegre, Chile, contra la alternativa de secado al aire libre con madera de *Pinus radiata*. En el secado artificial (secado convencional), con promedios de contenidos de humedad inicial de 110% hasta el 10% de humedad final, se obtuvieron tiempos de secado de 2.5, 6 y 14 días para 1", 2" y 3" de espesor respectivamente. El costo de secado para 1" de espesor al aire libre se estimó de 99.30 \$US Dls. por m³ y para el secado convencional, 454.91 \$US Dls. por m³.

Ávila (1985) realizó un estudio sobre la influencia del prevaporizado en las características y el tiempo de secado de la madera aserrada de 1" de espesor en mezclas de encinos rojos y blancos, utilizando dos programas de secado moderado-acelerado con 5 y 7 horas de prevaporizado. Encontró que los tiempos de secado fueron de 10.5 y 11 días desde el 50 y 60% de contenido de humedad inicial hasta el 8% de contenido de humedad final, la

calidad de la madera obtenida fue aceptable comparativamente con la obtenida en el secado con otros procedimientos en tiempos mayores a 20 días. Concluye que el vaporizado previo al proceso de secado ayuda a mejorar la calidad de secado y también reduce considerablemente los tiempos de secado.

Bejar (1985) reporta los resultados de un experimento de secado de madera de seis especies de encino en tres sistemas de secado: al aire libre, en estufa convencional y en dehumidificador, encontrando buenos resultados en los tres casos. Para el secado al aire libre, menciona que puede secarse sin problemas en climas templados donde la humedad relativa y temperatura no son muy severas, y para el secado convencional, recomienda utilizar los programas de secado generados en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP).

El Instituto Forestal de Chile (1987) reportó los costos de secado convencional por m³ y por pie tabla de madera seca de tres especies: *Laurelia philipiana* (tepa), *Pinus radiata* (pino insigne) y *Nothofagus sp* (Coigüe) que se determinaron en 25 mm y 50 mm de espesor para las dos primeras especies. Para tepa, sus costos fueron de \$7.78 y de \$11.66 (pesos chilenos por pie-tabla), respectivamente. Para pino insigne fueron de \$3.90 y de \$5.03, respectivamente, mientras que para Coigüe de 25 mm de espesor, su costo fue de \$23.18. Los tiempos de secado en 25 mm de espesor fueron de 8 días para tepa, 3.5 días para pino insigne y 28 días para Coigüe.

Simpson (1991) propone programas de secado en estufa convencional para diversas maderas, entre ellas el encino, así como las técnicas de control de humedad y cuidados que deben considerarse para evitar el desarrollo de defectos. Menciona que el apanamiento es un defecto de secado causado por esfuerzos internos de tensión que ocurren en las zonas de mayor debilidad como son los rayos de la madera. Este defecto no es visible en la superficie de las tablas y se observa hasta que la madera se somete a trabajos de maquinado.

4. MATERIALES Y MÉTODOS.

El experimento se desarrolló en el Campo Experimental San Martinito, ubicado en el Municipio de Tlahuapan, Puebla, utilizándose cuatro especies de madera de encino: *Quercus affinis*, *Q. crassifolia*, *Q. laurina* y *Q. potosina*, de éstas, las tres primeras pertenecen al grupo de encinos rojos y la última al grupo de encinos blancos.

4.1. MATERIALES.

Se describen los materiales e instalaciones empleadas en la presente investigación.

4.1.1. Colecta del material de estudio.

Se colectaron muestras botánicas para la identificación de las especies (en masas puras de bosque de encino y en asociación con pino) del lugar de colecta en el predio denominado “Derramaderos” localizado en el municipio de Victoria del estado de Guanajuato en las coordenadas 20° 16’ de latitud Norte y 100° 31’ de longitud Oeste y una altitud de 2500 msnm, la precipitación media anual es de 23 mm, con clima seco extremo y temperatura media anual de 17°C de acuerdo a la clasificación climática dada por García (1973).

Las muestras fueron identificadas en el herbario de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo por el M.C. Fernando Zavala Chávez y en el herbario del CENID-COMEF del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias por la Bióloga Marcela Gutiérrez. Se seleccionaron sólo especies (Figura 1) cuya conformación del arbolado reuniera las dimensiones mínimas en diámetro y altura para la obtención de madera aserrada de longitud comercial.

4.1.2. Preparación de la madera aserrada.

Se derribaron 91 árboles de encino (61 m^3) que se trocearon y trasladaron al Campo Experimental San Martinito, para su aserrado (Figura 2). De la madera aserrada se hizo una selección de tablas, considerando sólo aquellas de primera, segunda y tercera calidad, indicando en ellas los números de árbol, troza y tabla. Se utilizaron en total 600 tablas dimensionadas a $3/4$ " de espesor y anchos variables en 4", 6" y 8" por 8' de longitud, escogiéndose únicamente 100 tablas a evaluar por cada repetición.



Fig. 1. Arbolado de encino en el lugar de colecta.

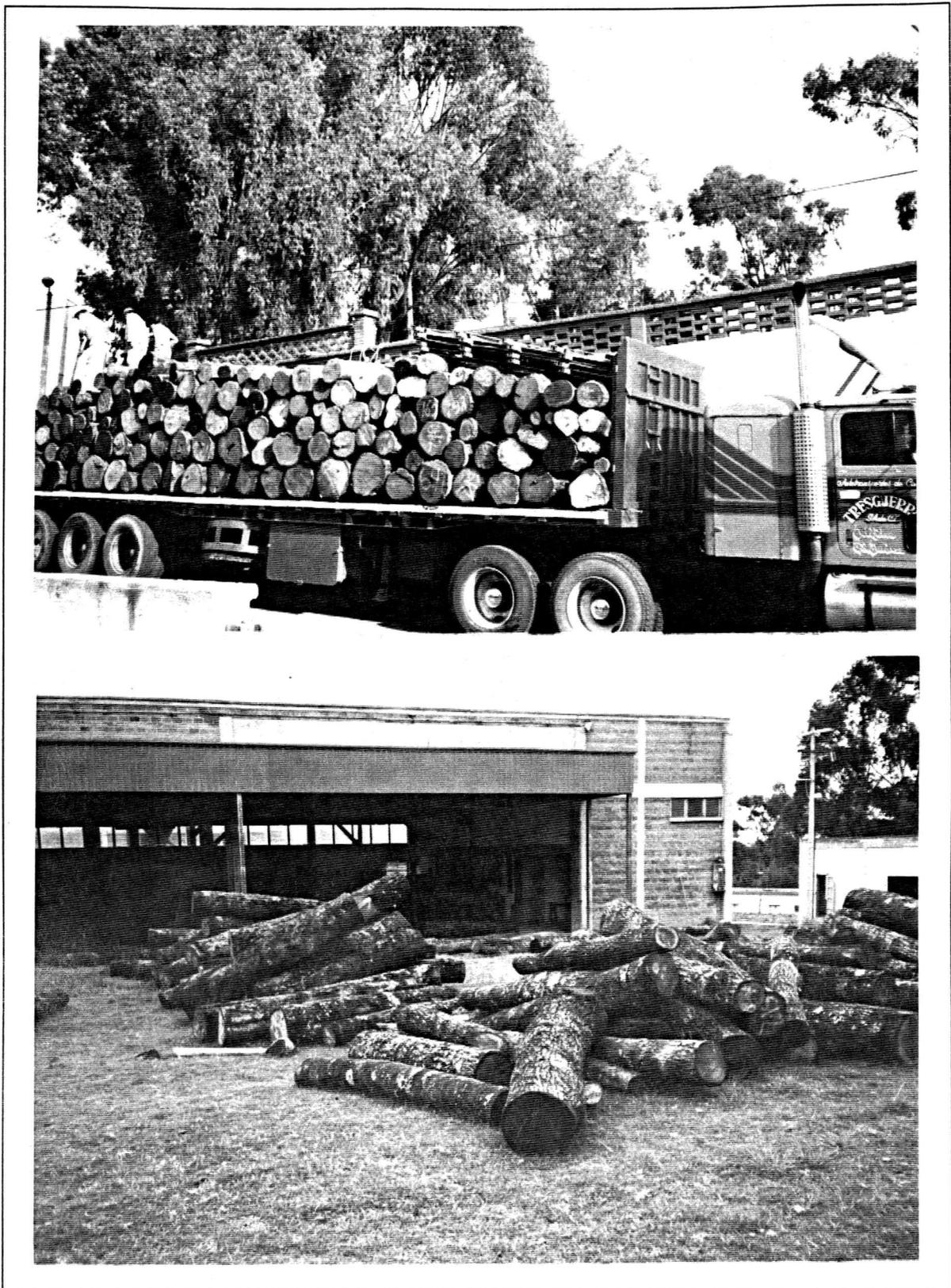


Fig. 2. Arbolado de encino en el lugar de experimentación.

4.1.3. Patio de secado.

El área del patio de secado consta de una superficie de 1500 m², del cual sólo se utilizaron 45 m² correspondiente a dos pilas. Las bases de las pilas son 12 prismas de concreto colocadas en hileras de 3 x 4 con 7 polines de 2" x 2" x 8'. La distancia mas baja que existe de la base al suelo es de 20 cm y la mas alta es de 40 cm. En la zona los vientos dominantes son de Sur-Oeste con una velocidad promedio de 1.6 a 3.3 m/segundo, la temperatura más alta es de 30°C en el mes de mayo y la más baja es de 0°C en los meses de enero y diciembre, siendo el promedio de temperatura máxima y mínima anual de 21.92°C y 6.83°C respectivamente.

4.1.4. Secador solar.

Se utilizó un secador solar tipo Oxford modificado, con capacidad para secar de 2000 a 2500 pies tabla de madera aserrada.

Está ubicado a 19° 21' de latitud Norte y 98° 21' de longitud Oeste y una altitud de 2500 msnm. Consta de una cámara fabricada con bastidores de madera, su superficie útil es de 18 m², todas sus paredes están cubiertas de plástico transparente. Posee un colector a base de láminas galvanizadas acanaladas pintadas de negro mate para favorecer la máxima absorción de energía y reducir la reflexión, el área del colector es de 30 m², compuesto por

dos partes: una paralela al piso y la otra con una pendiente de 25° con respecto a la horizontal. Contiene integrados dos ventiladores de 61 cm de diámetro con motor cada uno de 3/4 HP y 220 volts; posee un par de ventilas para intercambio de aire húmedo por aire seco. El techo es a dos aguas.

4.1.5. Secador convencional.

Se utilizó un secador convencional marca MOORE con capacidad para secar 2500 pies tabla de madera aserrada. Este secador consta de una cámara de secado de 5.5 metros de largo por 1.25 de ancho por 1.85 metros de alto.

Dicho secador cuenta con sistema de calefacción a base de serpentines alimentados con vapor; sistema de ventilación con cuatro ventiladores axiales montados en una flecha con motor externo de 6.5 HP; sistema de humidificación constituido por un tubo humidificador para inyección directa de vapor vivo y 4 pares de ventilas; sistema de control y registro, de operación semiautomática, para proporcionar las condiciones de temperatura y humedad relativa requeridas en el interior de la cámara y permitir conocer el contenido de humedad de la madera en cualquier momento del proceso de secado; una caldera con motor de 3 HP para suministrar el vapor de agua necesario.

4.1.6. Equipo auxiliar.

Se requirió de otras instalaciones y equipos auxiliares, tales como: un aserradero banda de 7" para aserrar la trocería de encino; un horno de laboratorio marca TECSA, en el cual se secaron las secciones de humedad para determinar el peso seco calculado y llevar el control de humedad de los tres procesos de secado; una balanza de precisión con aproximación al centésimo de gramo y capacidad para 1000 gramos y una balanza con aproximación al gramo y capacidad para 10 Kg.; flexómetros, vernier's, termómetros y psicrómetros.

4.2. MÉTODOS.

La metodología empleada para satisfacer los objetivos planteados, se detalla a continuación.

El experimento consistió en someter la madera de encino bajo los siguientes sistemas de secado: Al aire libre, en secador solar y en secador convencional, cada sistema con dos repeticiones, consistentes en dos pilas con 100 tablas clasificadas cada una.

4.2.1. Inspección inicial de las tablas.

A las 100 tablas de cada pila, se le determinaron sus dimensiones de ancho, grueso y longitud, así como la presencia y magnitud de los defectos tales como grietas, rajaduras y deformaciones: arqueadura, encorvadura, torcedura y acanaladura, como se ilustra en la figura 3 (a, b, c y d, respectivamente), esto con la finalidad de no considerarlas junto con aquellas que pudieran presentarse durante el proceso de secado.

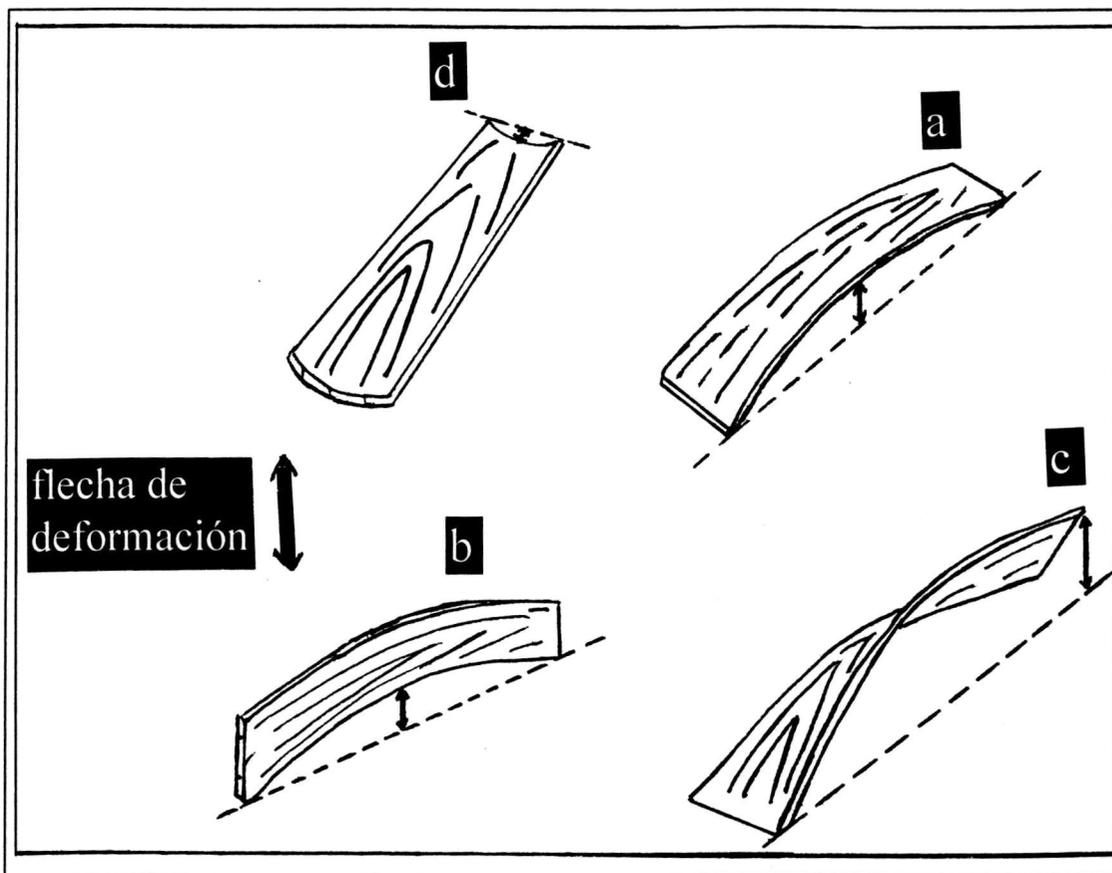


Fig. 3. Tipos de deformaciones: a.- arqueadura, b.- encorvadura, c.- torcedura, d.- acanaladura. (Fuentes, 1994).

4.2.2. Preparación de muestras de secado.

Para el seguimiento del proceso de secado, se utilizó el método de pesadas, que se basa en la pérdida de peso de las muestras de secado, que fueron ubicadas de manera intercalada entre las tablas de cada pila. La preparación de las muestras de secado y las secciones de humedad se realizó de la siguiente manera: Para cada pila de madera, se prepararon cuatro muestras, (8 en las dos repeticiones). Cada muestra de secado se cortó a 60 cm de longitud, obteniéndose a un lado de éstas, dos secciones de humedad (a y b) de 2.5 cm de ancho, como se puede observar en la Figura 4.

Se tuvo cuidado al obtener la muestra, que ésta no presentara nudos, corteza, pudrición o defectos que pudiesen afectar su representatividad durante el proceso de secado y que no fuese de las tablas más secas del lote.

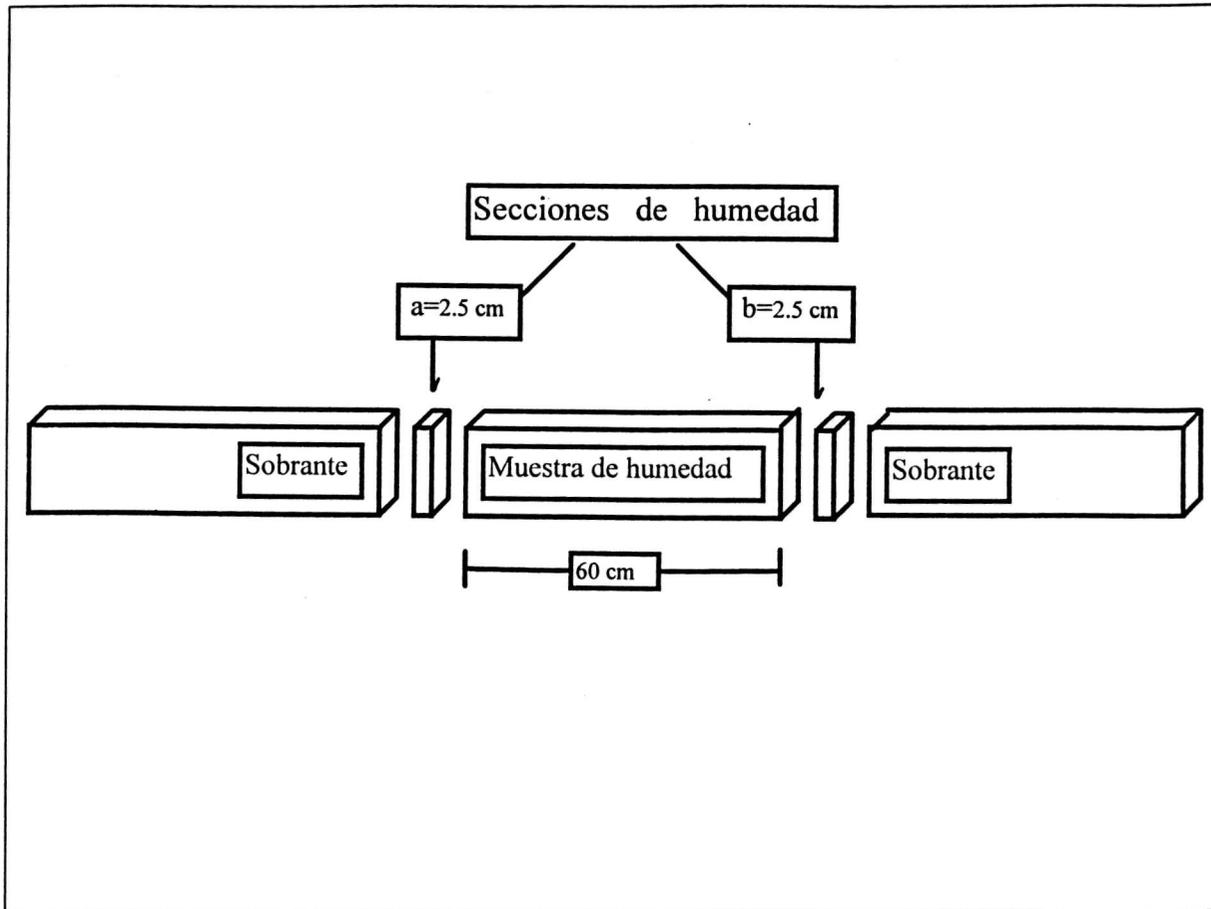


Fig. 4. Obtención de muestras de secado.

Una vez que se obtuvieron las muestras de secado, fueron pesadas en una balanza con capacidad para 10 Kg, inmediatamente después de cortarlas, sellando sus cabezas con la finalidad de eliminar el secado en estos puntos. Posterior a esto, fueron colocadas en la pila de madera tal como se ilustra en la Figura 5, para el caso de secado al aire libre, y de manera similar en los otros dos sistemas.



Fig. 5. Ubicación de las muestras en las pilas de secado al aire libre.

Las secciones a y b de cada tabla, fueron pesadas en un horno a una temperatura de $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$, pesándolas de nuevo hasta alcanzar un peso constante, para así determinar su peso anhidro. Posteriormente, se calcularon los CH iniciales de cada sección que al promediarlos nos proporcionó en forma indirecta el CH inicial de la muestra.

Con el promedio del CH de las dos secciones de humedad y el peso de la muestra al momento de cortarla, se calculó su peso seco. Con el peso seco calculado y los subsecuentes pesos de la muestra obtenidos a distintos intervalos de tiempo (llamados pesos corrientes) se fue llevando un registro y control del contenido de humedad durante todo el proceso de secado.

Para calcular el CH de las secciones, el peso seco calculado y el CH actualizado, se utilizaron las fórmulas (1), (2) y (3) respectivamente, como lo indica Simpson (1991).

El Contenido de humedad inicial de las secciones (CHs) se obtiene aplicando la fórmula siguiente:

$$\% \text{ CHs} = ((P_i - P_o) / P_o) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

P_i = peso inicial antes de remover el agua.

P_o = peso anhidro o peso seco.

El Peso seco calculado de la muestra (PSCm), se obtiene de la relación entre el peso de la muestra al tiempo en que se cortaron las secciones de humedad (P_i) y el contenido de humedad inicial promedio de las dos secciones (CHs), de la siguiente manera:

$$\% \text{ PSCm} = P_i / (1 + \text{CHs}/100) \quad (2)$$

El Contenido de humedad actual de la muestra (CHm actual), se obtiene con el peso corriente (P_c) y el peso seco calculado (PSC).

$$\text{CHm actual} = (P_c - \text{PSC} / \text{PSC}) \times 100 \quad (3)$$

Por otro lado, el apanalamiento es otro de los defectos más frecuentes durante el secado de la madera de encino. Su presencia puede representar una considerable pérdida del volumen de madera seca. Este defecto tiene una apariencia corrugada en la superficie y con frecuencia se asocia con el defecto de colapso severo (Simpson, 1991). Al respecto, se decidió considerar el apanalamiento en la evaluación, posteriormente al proceso de secado de la siguiente forma: de las muestras utilizadas para el control de secado, a una distancia de 20 cm de cada extremo de la pieza, se cortó una sección de 2.5 cm de ancho.

La evaluación consistió en realizar una inspección visual minuciosa de cada sección en el plano transversal ya que éste defecto no es visible en la superficie de la tabla y generalmente se detecta hasta que la madera se somete a trabajos de maquinado. Se contabilizó el número de grietas internas visibles de cada sección y se obtuvo el promedio de grietas por muestras.

Asimismo, de cada muestra de secado, se obtuvo otra sección de 2.5 cm de ancho para evaluar el gradiente de humedad final.

Cada sección, se dividió en 5 partes iguales (Figura 6), y a cada una se le calculó el CH final. Por diferencias de CH entre el más alto de la zona exterior y el de la parte central, se obtuvo el gradiente de humedad final, de acuerdo con la metodología empleada por Fuentes (1994).

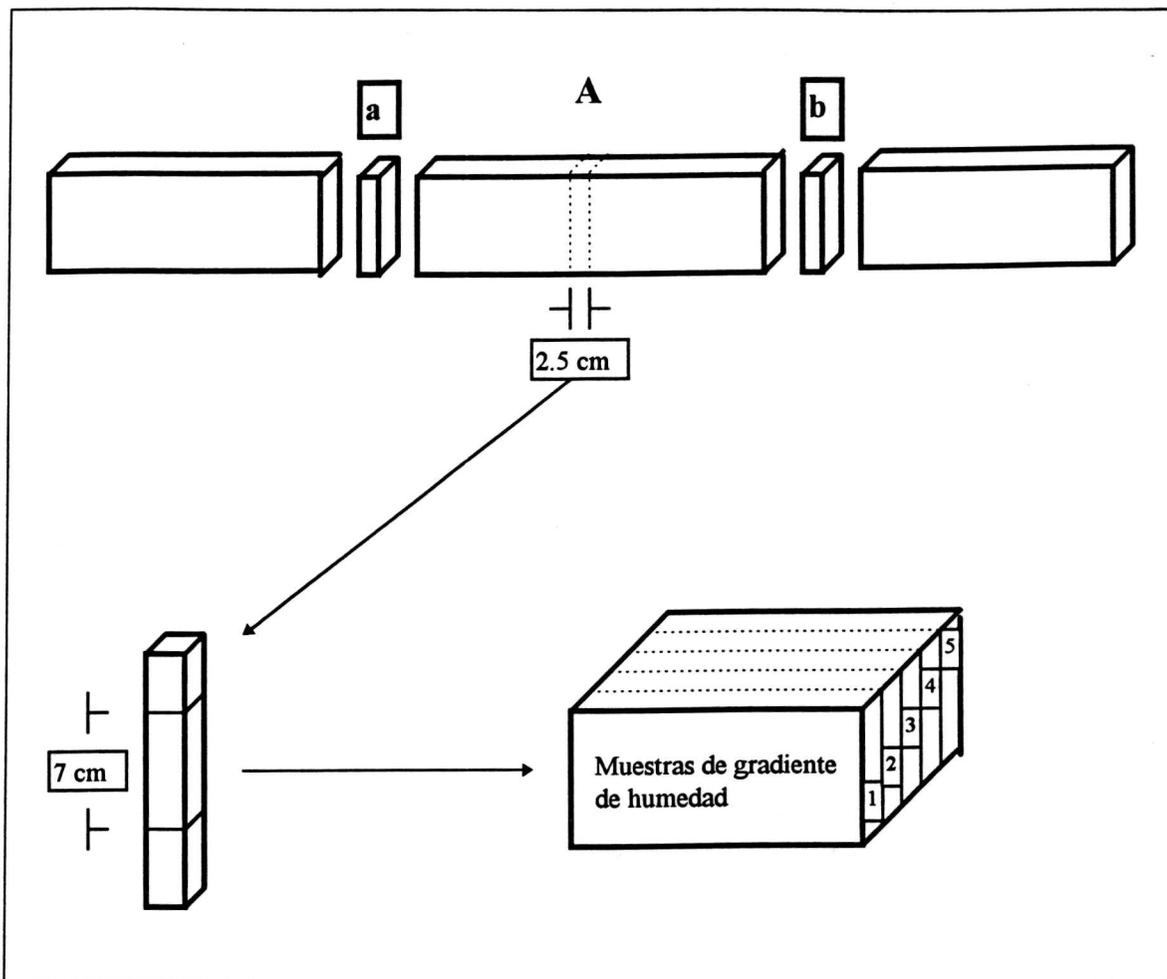


Fig. 6. Obtención de muestras para evaluación del gradiente de humedad.

4.2.3. Montaje de pilas para el secado al aire libre y control de secado.

Las pilas para el secado al aire fueron de 1.20 m de ancho por 2.44 m de longitud y 1.5 m de altura, con chimeneas de 5 cm de ancho, verticalmente las tablas fueron separadas por 4 fajillas de 3/4" de espesor por 1 1/2" de ancho. Se colocaron en la parte inferior las 100 tablas previamente medidas y evaluadas, completando el resto de la altura con tablas sin evaluar. A cada pila se le colocaron láminas galvanizadas acanaladas y en la parte superior,

costeras para protegerlas de la lluvia y de la radiación solar en los extremos durante el período de secado (Figura 7).

El control del secado se realizó con base en el CH de las muestras, las que se ubicaron a ambos lados de cada pila, dos de cada lado a una distancia de uno y dos tercios de la altura total de la pila. Los CH fueron determinados cada vez que las muestras de humedad se pesaron, con una periodicidad de 3 a 5 días entre una y otra, regresándolas inmediatamente después de cada pesada hasta que la madera alcanzó el contenido de humedad en equilibrio (CHE) con el ambiente.

Se colocó un psicrómetro entre las dos pilas, para llevar un registro de la temperatura y humedad relativa prevalecientes en el patio de secado, tomándose registros en los siguientes horarios: 7:00, 12:00, 14:00 y 18:00 horas.



Fig. 7. Pilas para el secado al aire libre.

Cuando se alcanzó el CHE con el ambiente, se dio por concluido el secado para este caso particular, elaborándose una curva de tiempo contra CH, para determinar así el momento en que se alcanzó el CHE.

Una vez terminado el proceso de secado, se volvieron a medir y registrar las dimensiones, las rajaduras y los alabeos finales de cada tabla evaluada, las mediciones se realizaron en el mismo punto que al inicio.

4.2.4. Montaje de pilas para el secado solar y control de secado.

Las pilas para el secado solar, se construyeron de 1.20 m de ancho por 2.44 m de longitud y 1.8 m de altura. Las tablas se unieron canto con canto para favorecer la circulación del aire a través de la pila de madera, verticalmente se usaron cuatro separadores por capa de 3/4" de espesor por 1 1/2" de ancho.

Las 100 tablas previamente medidas se colocaron en la parte inferior de las pilas completando el resto de la altura con tablas sin medir. Las muestras se colocaron en ambos lados de las pilas como en el sistema anterior (Figura 8). La periodicidad con que se pesaron las muestras fue de 3 a 5 días entre una y otra.

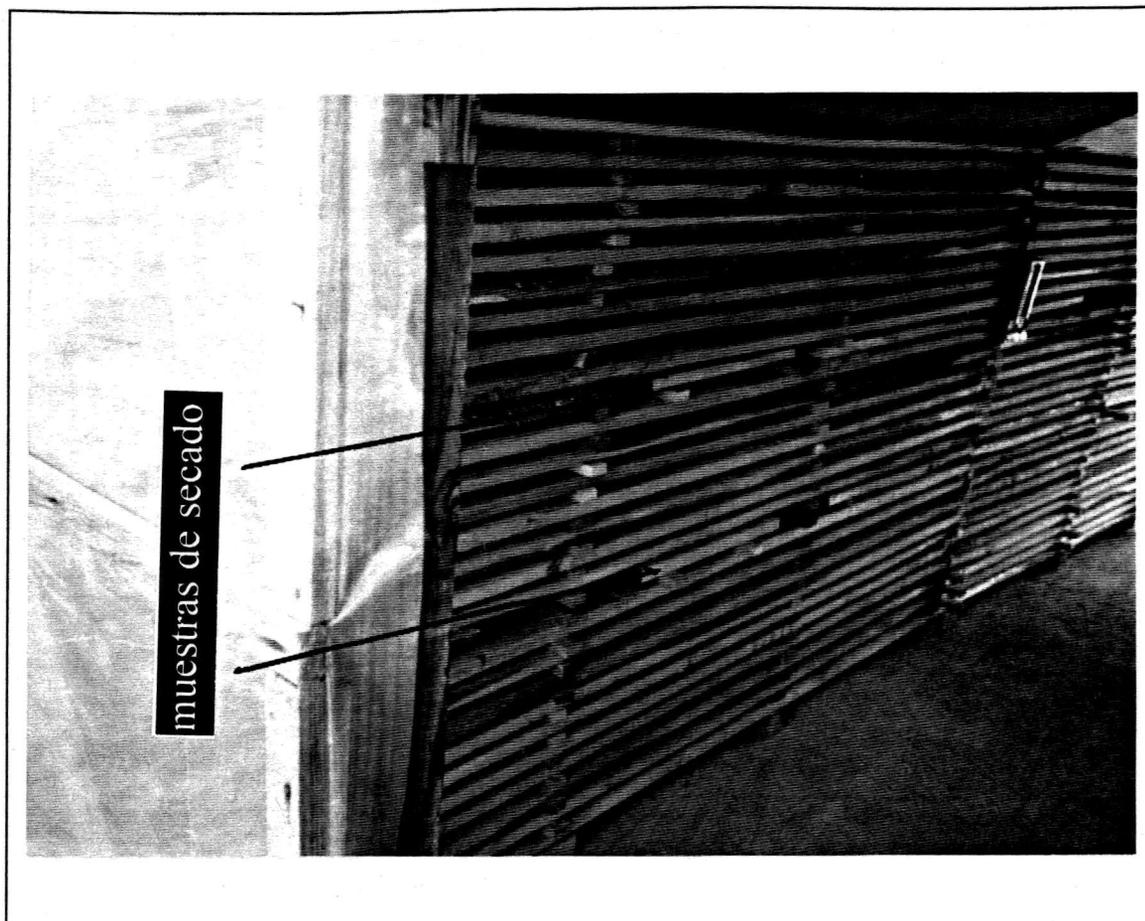


Fig. 8. Ubicación de las muestras en las pilas del secado solar.

Durante todo el proceso de secado solar, se mantuvo un psicrómetro entre las dos pilas de madera y de frente a los ventiladores, para llevar un registro de la temperatura y humedad relativa prevalcientes en el interior del secador, tomándose registros en los siguientes horarios: 7:00, 12:00, 14:00 y 18:00 horas.

El tiempo de operación de los ventiladores fue de las 7:00 a las 18:00 horas, dándose la apertura de las ventilas y puerta de las 18:00 a las 8:00 horas del siguiente día, permaneciendo cerrados el tiempo restante.

Se dio por concluido el secado, hasta obtener un contenido de humedad final promedio de 12%, elaborándose una curva de contenido de humedad contra tiempo, que nos permitió conocer el momento en que se alcanzó ese punto.

Una vez terminado el proceso de secado en secador solar (Figura 9), se volvieron a medir y registrar las dimensiones, las rajaduras y los alabeos finales de cada una de las 200 tablas medidas de ambas repeticiones, realizándose las mediciones en el mismo lugar en que se evaluaron al inicio. De las muestras de secado, se obtuvieron probetas de esfuerzos y nuevas secciones de humedad para corroborar el contenido de humedad final calculado.

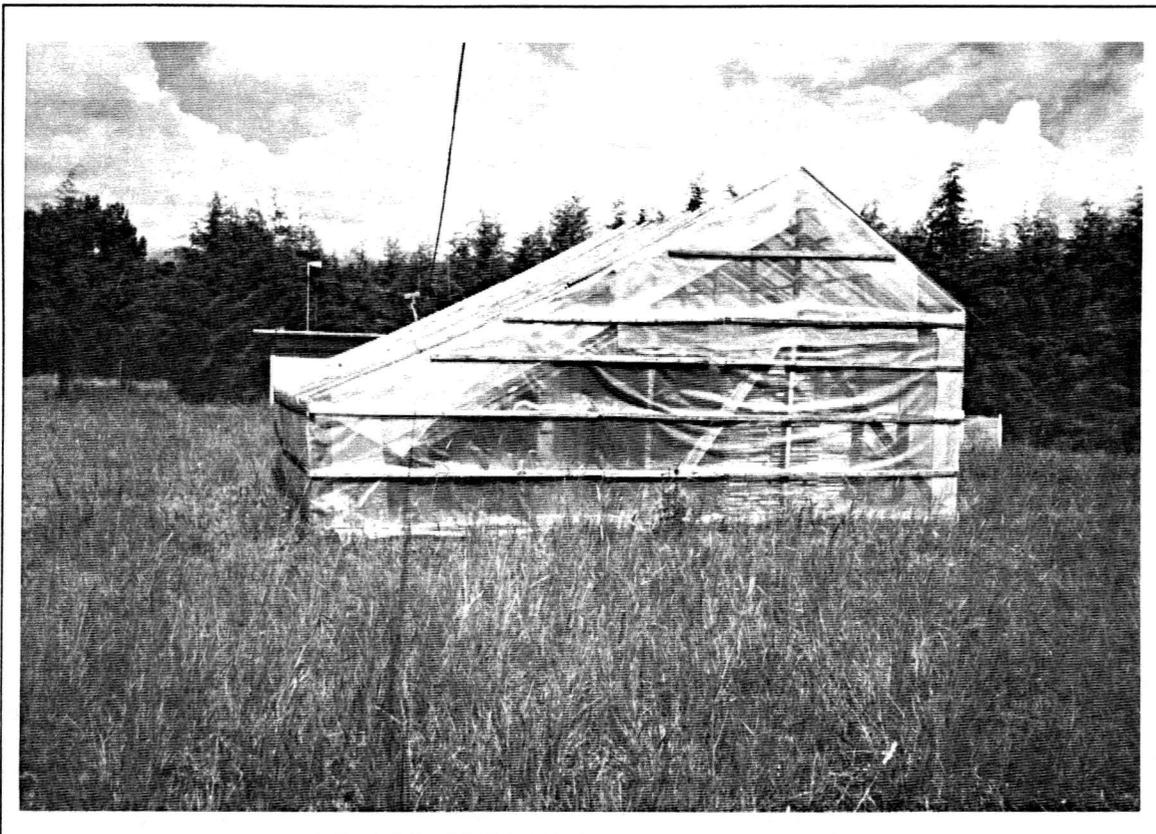


Fig. 9. Proceso de secado en secador solar.

4.2.5. Montaje de pilas para el secado convencional y control de secado.

Las pilas para el secado convencional se armaron de 1.20 m de ancho por 2.44 m de longitud por 1.8.0 m de altura. Las tablas fueron colocadas extremo con extremo. Verticalmente fueron separadas por 5 fajillas de 3/4" de espesor por 1 1/2" de ancho, colocando las 100 tablas medidas en la parte inferior de cada pila, completando el resto con tablas sin medir. Aquí también se colocaron sobre las pilas 4 prismas de concreto con un peso de 35 Kg cada uno.

El control sobre el proceso de secado, se realizó con base en el contenido de humedad promedio de las dos cargas, que se determinó conforme al método descrito por Simpson (1991), llevándose un registro de la humedad y considerándose el promedio de las 4 muestras más húmedas. Con esto, se pudo conocer el momento preciso en que se debía realizar el cambio de etapa correspondiente al programa de secado utilizado; Cuatro muestras de secado se ubicaron en cada pila, tal como se ilustra en la Figura 10.

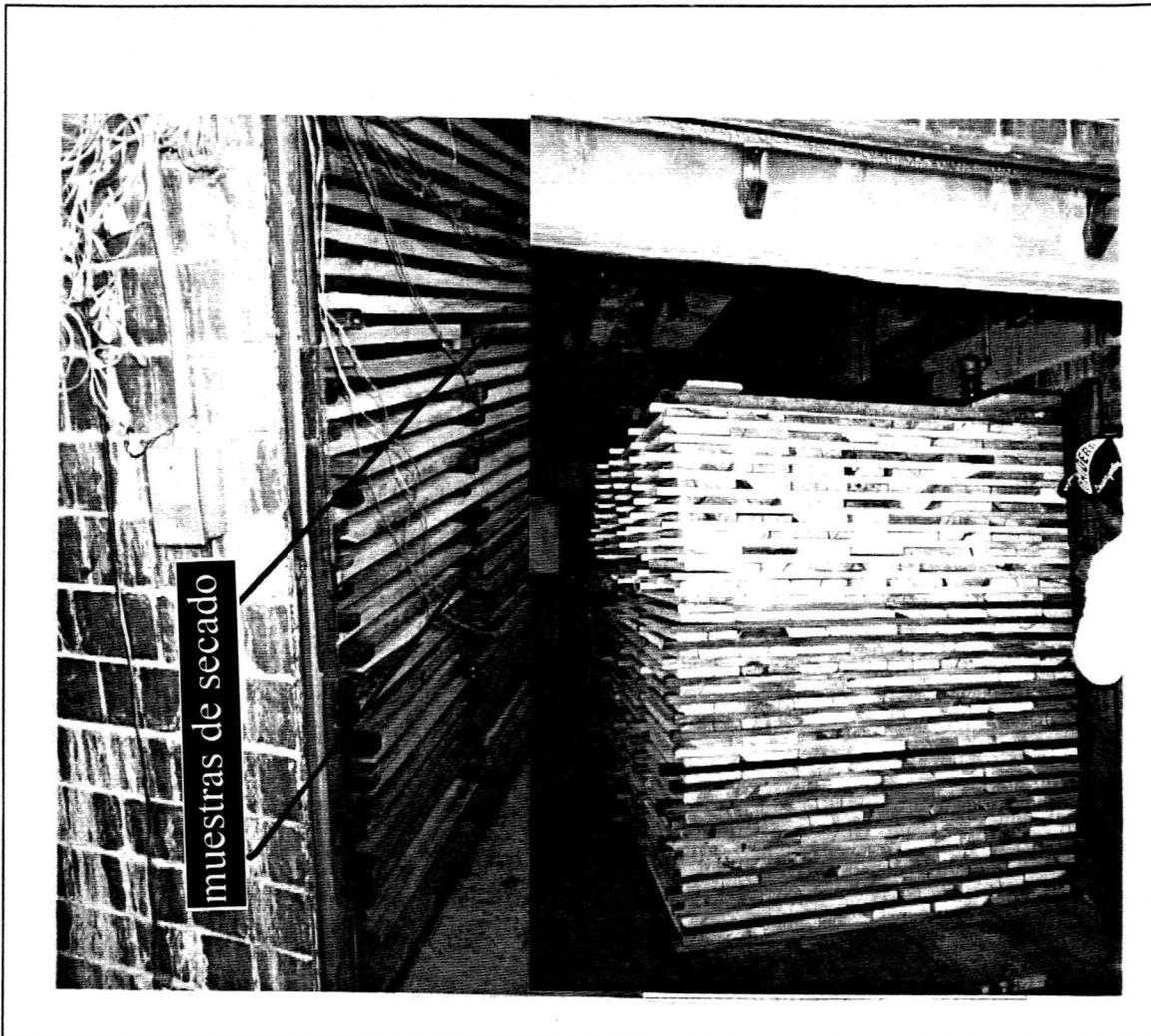


Fig. 10. Ubicación de las muestras en las pilas de secado convencional.

Los contenidos de humedad fueron determinados cada vez que las muestras de secado se pesaron, con un tiempo promedio de 10 a 12 horas entre una y otra, hasta que la madera alcanzó el contenido de humedad deseado.

Durante todo el proceso, se registraron las gráficas de temperatura del bulbo seco y del bulbo húmedo para determinar las condiciones de temperatura y humedad relativa prevalcientes en el interior del secador.

El secado en el secador convencional, se realizó utilizando el programa de secado Especial I, para madera aserrada de encino de 3/4" de espesor que se muestra en el Cuadro 1, propuesto por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Los tiempos de duración de cada etapa de secado conforme a las especificaciones del programa, se sintetizan en el Anexo 1.

Previo al inicio del proceso de secado, se le dio a la madera una etapa de calentamiento, elevando la temperatura en forma gradual hasta los 110°F bajo condiciones de humedad relativa saturada.

Cuadro 1. Programa de Secado Especial I, para secado de madera aserrada de encino de 3/4" de espesor. (INIFAP).

ETAPA	CLASE C.H.	TBS. (°F)	DEP (°F)	TBH. (°F)	HR (%)	CHE (%)
	Inic-X	110	0	110	100	
1	X-40	110	5	105	84	
2	40-35	110	10	100	70	12.0
3	35-30	115	12	103	66	10.9
4	30-25	125	16	109	59	09.4
5	25-20	140	22	118	51	07.6
6	20-15	150	29	121	48	06.0
	15-S=?	150	40	110	28	04.2
Igualamiento	S=	150				
Acondicionamiento	M=	150				

CH = Contenido de humedad, TBS = Temperatura del bulbo seco; DEP = Depresión, BH = Temperatura del bulbo húmedo, CHE = CH en equilibrio.

Los cambios de etapas, se realizaron sucesivamente cuando la pérdida de humedad promedio de las muestras más húmedas era de 5 grados, hasta tener el contenido de humedad final deseado (12%). En ese momento, se inició la etapa de igualamiento con la finalidad de uniformizar el contenido de humedad de todas las tablas de la carga, que se suspendió cuando la muestra más seca tuvo dos grados de humedad menos que el CH final deseado. Enseguida, se aplicó una etapa de acondicionamiento en donde se trató de reducir el gradiente de humedad y eliminar los esfuerzos residuales del secado, manteniéndose constante la temperatura del bulbo seco de la última etapa anterior al igualamiento.

Para decidir el momento de terminar la fase del acondicionamiento, de las muestras de secado se obtuvieron probetas de esfuerzos (Figura 11) tal como lo propone Simpson (1991).

Así también, se obtuvieron secciones para gradientes de humedad del mismo modo que en el secado al aire libre y solar, y nuevas secciones de humedad para corroborar el contenido de humedad final.

Una vez terminado el proceso de secado, se volvieron a medir y registrar las dimensiones, las rajaduras y los alabeos finales de cada tabla medida.



Fig. 11. Probetas de esfuerzos de secado.

4.2.6. Evaluación de la calidad de secado.

En la evaluación de la calidad de madera seca, se utilizó la Norma de Clasificación Chilena NCh. 178.Of.79. “Madera aserrada de Pino insigne. Clasificación por aspecto”, debido a que se encontró satisfactoria para hacer la evaluación y comparación del secado en los tres sistemas considerados. Esta maneja rangos de valores permisibles en cada tipo de defecto de acuerdo a las dimensiones de la pieza (Cuadro 2).

Cuadro 2. Porcentajes de valores permisibles de defectos evaluados. NCh. 178.Of.79.

DEFECTO	CARACTERÍSTICA A MEDIR	VALOR MÁXIMO PERMISIBLE EN % DE SU DIMENSION TOTAL			
		G1	G2	G3	G4
	respecto a:				
RAJADURAS	al largo	3.0	5.0	8.0	> 8.0
GRIETAS	al largo	10.0	20.0	30.0	> 30.0
ARQUEADURA	al largo	00	2.0	4.0	> 4.0
ENCORVADURA	al largo	00	1.0	1.5	> 1.5
TORCEDURA	al largo	00	1.0	1.5	> 1.5
ACANALADURA	al ancho	00	0.5	1.0	> 1.0

La inspección y evaluación de la calidad de secado, se realizó con base en la intensidad de defectos que se presentaron en las tablas de los diferentes procesos, de manera que cada pieza evaluada se ubicó en la clasificación de grados de calidad correspondiente de acuerdo a la tolerancia de sus defectos, aplicando a cada grado un factor de desclasificación (F.D.) utilizado por Kauman y Mittak (1966) y Bravo (1977), tal como se observa en el Cuadro 3, el cual considera en las rajaduras la longitud máxima permisible respecto al largo total de las piezas y en las grietas la suma de éstas. En relación a los alabeos, para la acanaladura, considera un porcentaje máximo admisible de la deformación respecto al ancho de la tabla y para los otros tres tipos restantes (arqueadura, encorvadura y torcedura) un porcentaje de deformación con respecto al largo de la pieza.

Se otorgó el grado 1 a las piezas que se presentaron completamente libres de defectos o que sus diferencias entre la medición inicial y la medición final fuera cero, hasta el grado 4 para tablas que presentaron defectos intensos, conforme al grado de clasificación presentada en el Cuadro 2.

Cuadro 3. Grados de calidad por factor de desclasificación. Tomado de Kauman y Mittak (1966).

GRADO	FACTOR DE DESCLASIFICACION	INTENSIDAD DE DEFECTO
1	0.00	AUSENTE
2	0.50	LIGERO
3	2.00	DE REGULAR A FUERTE
4	2.50	INTENSO

Enseguida se obtuvo la suma de las medias ponderadas del factor de desclasificación por tipo de defecto, esto es: rajaduras, grietas y alabeos, con lo que se obtuvo finalmente el grado total de desclasificación también conocido como Índice de Calidad de Secado, como se observa en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Clasificación de la calidad de secado, según Kauman y Mittak (1966).

INDICE DE CALIDAD DE SECADO	MEDIA PONDERADA DE DESCLASIFICACION	CONDICIONES DE SECADO
EXCELENTE	0.00 a 0.00	ADECUADAS
MUY BUENA	0.01 a 0.50	
BUENA	0.51 a 1.00	
SATISFACTORIA	1.01 a 1.50	POCO ADECUADAS
REGULAR	1.51 a 2.00	INADECUADAS
DEFECTUOSA	2.01 a 3.00	
MALA	3.01 a 5.00	
MUY MALA	Mayor de 5.00	

4.2.7. Evaluación de los tiempos de secado.

La evaluación del ritmo y tiempo de secado en los tres sistemas se realizó en base al CH promedio de las cuatro muestras por carga que se emplearon al aire libre, en secador solar y en secador convencional.

Para la evaluación de los tiempos de secado se empleó la metodología utilizada por Fuentes (1994), en el cual se elimina el efecto del diferente contenido de humedad inicial entre repeticiones y cargas sometidas a cada sistema de secado. Ya las diferencias en el CHi no nos permitirían hacer comparables las curvas de cada sistema, se desarrolló un algoritmo matemático (elaborado por Zamudio (s/f) y aplicado por Fuentes (1994)) para estandarizar las observaciones de cada repetición (Anexos II y III) tomándose como base el contenido de humedad inicial mayor entre las dos repeticiones de cada tratamiento y, obtener una sola curva equivalente que en común tuvieran el mismo CH inicial y final para los tres tratamientos de secado, y posteriormente, proceder a realizar el análisis comparativo de los tiempos de secado entre éstos.

Se consideró que las curvas de secado deberían partir de un 63% de contenido de humedad inicial y terminar en el 12%, porque la primera humedad fue la más frecuente en las pilas y la última, es el porcentaje de humedad de uso más común para madera seca.

La construcción del algoritmo establece las siguientes restricciones: a). requiere cuando menos de dos repeticiones y b), que las diferencias del CHi sean mayores o igual al 10%. Además, está basado en los siguientes supuestos:

i).- La velocidad de caída de la curva de secado es mayor cuando el CHi es más alto.

ii).- El diferencial de CH de ambas curvas de secado, tiende a cero a medida que el tiempo de secado se prolonga o tiende a infinito.

Dado que las diferencias en CHi fueron mayores al 10% únicamente entre las repeticiones del secador solar, el procedimiento utilizado consistió en los pasos siguientes.

1.- Estandarizar las curvas de secado de cada repetición a través de sus contenidos de humedad iniciales, esto es, dividir cada observación entre su CH inicial correspondiente.

2.- Generar la curva guía a través del siguiente modelo:

$$CH1 = \exp [-b* (t1)^c] \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

CH1 = observaciones de la curva con mayor CHi dividido por la primera observación.

t1 = tiempos de la curva con mayor Chi

b,c = parámetros de las función

3.- Encontrar los parámetros (b y c) de mejor ajuste al modelo que representaría la velocidad de caída (velocidad de secado) en tiempos determinados, considerando el CH inicial mayor entre las dos repeticiones del tratamiento.

4.- Generar la curva compensadora o Curva Equivalente de secado a través del siguiente modelo:

$$DCH = k1 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

DCH = Curva equivalente de secado.

$$K1 = [(CHi1-CHi2)^{(1-w*t2)}*exp(-a*t2)]$$

A su vez: Chi1 = CH inicial mayor; Chi2 = CH inicial menor.

t2 = tiempo al que se tomaron las observaciones de la curva con Chi2.

w y a = parámetros de la función

5.- Encontrar los parámetros (w y a) de mejor ajuste al modelo para obtener la curva compensadora, en la cual se considera el diferencial de CH iniciales de ambas repeticiones, en los tiempos de las observaciones con menor CHi.

6.- Obtener las observaciones estimadas cada 12 horas, utilizando los parámetros estimados y estableciendo CH inicial del 63% y final del 12%.

7.- Obtener el gráfico de contenido de humedad-tiempo con las observaciones indicadas en el punto 6.

Los modelos que se utilizaron para generar la Curva Guía y la Curva Equivalente, se procesaron mediante un procedimiento no lineal con el paquete SAS (Statistical Analysis System).

Para los tratamientos de secado al aire libre y convencional, las diferencias en el contenido de humedad, entre repeticiones fueron menores al 5% de CH, razón por la que se decidió no aplicar el modelo de la curva compensadora, ya que por diseño del modelo, no se daría el ajuste esperado y los valores estimados no serían representativos del comportamiento del secado. Las variantes consideradas en estos casos fueron las siguientes:

1.- Con los datos de ambas repeticiones, se obtuvo una curva de secado promedio (Curva estándar), tomando en cuenta los contenidos de humedad registrados en cada etapa de medición.

2.- Generar la curva guía a través del siguiente modelo:

$$CH1 = \exp [-b * (t)^c] \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

CH1 = observaciones totales divididas entre el Chi mayor.

t = tiempos de la curva; b,c = parámetros de las función

3.- Encontrar los parámetros (b y c) de mejor ajuste al modelo que representaría la velocidad de caída de la curva en tiempos determinados, considerando el contenido de humedad inicial (Chi) mayor.

4.- Con el promedio de las observaciones estandarizadas, se obtuvo la gráfica de contenido de humedad-tiempo en un rango de 63% CHi y final del 12%.

Al obtener las curvas de secado en los tres tratamientos, se compararon y se analizaron de manera conjunta.

Para evaluar el ritmo de secado de cada tratamiento se realizó por separado un Análisis de Varianza para los ritmos de secado, desde verde hasta el 30% de humedad y otro a partir del 30% de contenido de humedad hasta un 12% de humedad final, tomando la media aritmética de los ritmos individuales de cada una de las cuatro muestras por carga.

Además de esta evaluación, se determinó el ritmo de secado de verde al 30% de CH y del 30% al CH final, los cuales fueron sometidos a un análisis de varianza para determinar la posible diferencia estadística de la velocidad de secado entre sistemas.

4.2.8. Evaluación del costo de infraestructura y equipos requeridos en el secado.

El proceso de secado tiene como premisa reducir el contenido de humedad de la madera con el menor número de defectos, en el menor tiempo posible y con costos bajos, sin embargo, el tiempo, calidad y costos, dependen fundamentalmente del sistema de secado que se utilice.

Para la evaluación de los costos de la madera seca se utilizó la metodología propuesta en el manual de secado de la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC, 1989), que considera dentro de los costos de secado a nivel industrial, los siguientes factores: La inversión en equipos y materiales, el flujo de capital, el consumo anual de madera, los tipos de productos que se elaboran, las fuentes de energía y/o calor disponibles, el tipo de madera a secar (especie, espesor y precio), los tiempos de secado, las pérdidas de madera durante el proceso de secado, la mano de obra requerida, y los salarios.

Los costos de la madera seca, se obtuvieron considerando los siguientes factores económicos: a).- Un costo por administración, en donde se incluyen gastos de operación como: papelería, gasolina, agua, alumbrado y comisiones por venta y, b).- Un costo por el uso de combustible, fundamentado en que el sistema convencional emplea una caldera que se alimenta a base de hidrocarburos y que al transformarlos en energía calorífica, producen contaminantes en el aire. Este costo se estimó como un porcentaje sobre el precio del combustible empleado y el costo aproximado que representaría limpiar el aire.

Los costos de inversión fija por concepto de obra civil, en el que se contemplan los gastos de preparación del terreno y la construcción de edificios (oficinas, casetas de vigilancia), no se consideraron en ésta investigación para ninguno de los tres sistemas evaluados.

Para hacer comparable entre sistemas los costos unitarios de secado, se consideró un volúmen igual en los tres sistemas, tomando como referencia la capacidad de un secador convencional a nivel comercial industrial (25,000 pies-tabla de madera aserrada) y el tiempo de secado que se requiere en cada secador.

En cada uno de los sistemas de secado, se calculó también su relación beneficio-costo, con la finalidad de obtener más elementos sobre las ventajas y/o desventajas entre el uso de uno u otro(s) sistema(s), dadas las condiciones particulares de secado. Para calcular esta relación se dividió el precio de mercado por m^3 de la madera de encino entre el costo total de secado calculado en este experimento.

4.2.8.1. Costos de secado al aire libre.

En el cuadro 5, se presentan los factores que se consideraron en los costos del secado al aire libre.

Cuadro 5. Factores económicos considerados en el secado al aire libre.

C O N C E P T O	SÍMBOLO	UNIDAD
Inversión inicial y reposición de materiales.	I	\$
Porcentaje anual de depreciación (base 5 años).	F1	%/año
Volumen de madera a secar por año.	Vm	m ³ /año
Tasa de interés anual.	i	%/año
Área del patio de secado.	Ap	m ²
Costo del terreno (predial).	K1	\$/m ²
Precio actual de madera de encino más flete más el aserrado considerando el coeficiente de aserrío.	Pm	\$/m ³
Tiempo de duración del secado al CH final.	Ts	meses
Costos de administración.	Ca	\$/m ³
Porcentaje de pérdidas durante el secado.	Pw	%
Salarios de mano de obra.	L	\$/hora

4.2.8.2. Costos de secado en secador solar.

Se presentan en el siguiente Cuadro 6, los factores considerados en los costos del secado solar.

Cuadro 6. Factores económicos considerados en el secado solar.

C O N C E P T O	SIMBOLO	UNIDAD
Inversión inicial y reposición de materiales.	I	\$
Porcentaje anual de depreciación (base 5 años).	F1	%/año
Volumen de madera a secar por año.	Vm	m ³ /año
Tasa de interés anual.	i	%/año
Área del patio de secado.	Ap	m ²
Costo del terreno (predial).	K1	\$/m ²
Potencia requerida de los ventiladores.	Nw	Kwatt
Consumo de energía de los ventiladores.	Y	%
Costo de la energía.	Pe	\$/Kwh
Precio actual de madera de encino más flete, más aserrado considerando el coeficiente de aserrío.	Pm	\$/m ³
Capacidad del secador en volumen de madera.	Vs	\$/m ³
Tiempo de duración del secado al CH final.	Ts	meses
Costos de administración.	Ca	\$/m ³
Porcentaje de pérdidas durante el secado.	Pw	%
Salarios de mano de obra.	L	\$/hora

4.2.8.3. Costos de secado en secador convencional.

En el Cuadro 7, se presentan los factores a considerar en el secado convencional.

Cuadro 7. Factores económicos considerados en el secado convencional.

C O N C E P T O	SÍMBOLO	UNIDAD
Inversión inicial y reposición de materiales.	I	\$
Porcentaje anual de depreciación (base 5 años).	F1	%/año
Volumen de madera a secar por año.	Vm	m ³ /año
Tasa de interés anual.	i	%/año
Área del patio de secado.	Ap	m ²
Costo del terreno (predial).	K1	\$/m ²
Extracción promedio de humedad por m ³ de madera W=((CHi-CHf)/100)x Densidad básica.	W	Kg/m ³
Consumo medio de combustible/año/Kg agua extraída	Q	lt/Kg agua
Precio actual de combustible/galón.	Pq	\$/Gal
Potencia requerida de los ventiladores.	Nw	Kwatt
Consumo de energía de los ventiladores.	Y	%
Costo de la energía.	Pe	\$/Kwh
Precio actual de madera de encino más flete más aserrado considerando el coeficiente de aserrío.	Pm	\$/m ³
Capacidad del secador en volumen de madera.	Vs	\$/m ³
Tiempo de duración del secado al CH final.	Ts	meses
Porcentaje de pérdidas durante el secado.	Pw	%
Salarios de mano de obra.	L	\$/hora

4.2.9. Evaluación del consumo de energía e insumos.

En el secado convencional y el solar, se registraron los tiempos de operación del equipo que consumió energía: motores de ventiladores, de la caldera, del aparato de control y del compresor según corresponden, para así determinar los costos obtenidos en este rubro de los sistemas mencionados.

En el secador solar, se registró el tiempo de funcionamiento de los 2 ventiladores de 3/4 de HP y 220 volts con capacidad para mover 10,300 m³ de aire, que estuvieron en operación durante 11 horas diarias.

En el secado convencional, se registraron los tiempos de operación del siguiente equipo: 4 ventiladores de 6.5 HP. de 220 volts, un compresor de 1 HP. y una caldera de 3 HP. Los ventiladores estuvieron en operación por 22 de 24 horas al día, el compresor por 10 de 24 horas y la caldera por 1.7 de 24 horas al día.

5. RESULTADOS.

Se presentan los resultados de calidad, tiempo y costos de la madera aserrada de encino en los tres tratamientos considerados, así como la comparación entre éstos.

5.1. CALIDAD DE LA MADERA SECA.

Como se indicó en la metodología, los valores manejados fueron los que resultaron de las diferencias entre la medición inicial y la final de la magnitud de los defectos y deformaciones desarrollados en el proceso de secado.

5.1.1. Madera secada al aire libre.

Los resultados de distribución de las tablas (200) por grado de calidad y por repetición de acuerdo al tipo e intensidad de sus defectos, se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Número de tablas distribuidas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado al aire.

G R A D O								
DEFECTOS	1		2		3		4	
	REPETICIÓN		REPETICIÓN		REPETICIÓN		REPETICIÓN	
	1	2	1	2	1	2	1	2
ARQUEADURA	49	69	51	31	0	0	0	0
ENCORVADURA	38	60	62	40	0	0	0	0
TORCEDURA	44	46	52	52	4	2	0	0
ACANALADURA	7	5	40	33	47	50	6	12
GRIETAS	43	76	16	8	10	8	31	8
RAJADURAS	70	83	18	11	8	6	4	0

A la suma de las tablas de encino en ambas repeticiones ubicadas en los grados 2, 3 y 4 ya que en sí, son los que contribuyen a bajar la calidad de la madera seca, se les aplicó un factor de desclasificación (F.D) para obtener la suma de las medias ponderadas. Estos valores se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 9. Índice de calidad de secado al aire libre respecto a grietas, rajaduras y alabeos.

INTENSIDAD (F.D)	GRIETAS		RAJADURAS		ÍNDICE GRIETAS+RAJADURAS				
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD					
S/DEFECTO (0.00)	119	0.0	153	0.00	00.0				
LIGERO (0.05)	24	12.0	29	14.5	26.5				
REGULAR (2.00)	18	36.0	14	28.0	64.0				
INTENSO (2.50)	39	97.5	4	10.0	107.5				
TOTAL	200	145	200	52.5	197.5				
MEDIA/DEFECTO	0.727		0.2620		0.989				
	ARQUEADURA		ENCORVADURA		TORCEDURA		ACANALADURA		ÍNDICE ALABEO
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	
S/DEFECTO (0.00)	118	0.0	98	0.0	90	0.0	12	0.0	0.0
LIGERO (0.50)	82	41.0	102	51.0	104	52.0	73	36.5	180.5
REGULAR (2.00)	0	0.0	0	0.0	6	12.0	97	194.0	206.0
INTENSO (2.50)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	18	45.0	45.0
TOTAL	200	41.0	200	51.0	200	64.0	200	275.5	431.5
MEDIA/DEFECTO	0.205		0.255		0.32		1.3775		2.157

La calidad de secado resultante de la evaluación en el sistema de secado al aire libre, caé en el nivel de MALA (Cuadro 10), ya que el valor de la sumatoria (3.1465) de sus medias ponderadas de desclasificación la ubicaron en un rango de 3.01 a 3.5, (Cuadro 4), cuyas condiciones de secado son consideradas INADECUADAS.

Cuadro 10. Índice de calidad de secado resultante al aire libre.

SUMA DE LAS MEDIAS PONDERADAS Grietas + Rajaduras + Alabeos	ÍNDICE DE CALIDAD	CONDICIONES DE SECADO
$0.727 + 0.262 + 2.1575 = 3.1465$	MALA	INADECUADAS

El grado de participación porcentual en la desclasificación de calidad de la madera por defectos, se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Participación porcentual de desclasificación de la madera secada al aire libre.

DEFECTOS	FACTOR DE DESCLASIFICACION (F.D.)	%
ARQUEADURA	0.205	6.52
ENCORVADURA	0.255	8.11
TORCEDURA	0.320	10.18
ACANALADURA	1.377	43.80
SUBTOTAL	2.157	68.60
GRIETAS	0.727	23.12
RAJADURAS	0.262	8.33
SUBTOTAL	0.987	31.39
TOTAL	3.146	100.00

Como puede observarse, la desclasificación por defectos fue mayor en los alabeos o deformaciones y dentro de estas, el defecto de acanaladura fue el de mayor influencia seguido por las torceduras, encorvaduras y arqueaduras en orden de la intensidad que presentaron.

Respecto a las rajaduras y grietas, este valor, también se considera alto, presentándose la mayor incidencia en las grietas.

5.1.2. Madera secada en el secador solar.

Los resultados de distribución de las tablas (200) por grado de calidad y por repetición de acuerdo a la intensidad de sus defectos, se presentan en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Número de tablas distribuidas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado solar.

G R A D O								
DEFECTOS	1		2		3		4	
	REPETICIÓN							
	1	2	1	2	1	2	1	2
ARQUEADURA	32	58	68	42	0	0	0	0
ENCORVADURA	23	21	77	79	0	0	0	0
TORCEDURA	41	39	51	53	7	8	1	0
ACANALADURA	20	37	56	42	23	21	1	0
GRIETAS	71	91	20	5	3	1	6	3
RAJADURAS	66	89	15	10	15	1	4	0

A la suma de las tablas de encino en ambas repeticiones ubicadas en los grados 2, 3 y 4, se les aplicó el factor de desclasificación (F.D) antes mencionado para obtener la suma de las medias ponderadas de sus defectos, cuyos valores se presentan en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Índice de calidad de secado solar respecto a grietas, rajaduras y alabeos.

INTENSIDAD(FD)	GRIETAS		RAJADURAS		ÍNDICE GRIETAS + RAJADURAS				
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD					
S/DEFECTO (0.0)	162	0.0	155	0.0	0.0				
LIGERO (0.05)	25	12.5	25	12.5	25.0				
REGULAR (2.00)	4	8.0	16	32.0	40.0				
INTENSO (2.50)	9	22.5	5	12.5	35.0				
TOTAL	200	42.0	200	57.0	99.0				
MEDIA/DEFECTO	0.21		0.285		0.495				
	ARQUEADUR A		ENCORVADURA		TORCEDURA		ACANALADUR A		ÍNDICE ALABEO
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	
S/DEFECTO (0.0)	90	0.0	44	0.0	51	0.0	51	0.0	0.0
LIGERO (0.05)	110	55.0	156	78.0	104	52.0	98	49.0	234.0
REGULAR (2.00)	0	0.0	0	0.0	15	30.0	44	88.0	118.0
INTENSO (2.50)	0	0.0	0	0.0	1	2.5	1	2.5	2.5
TOTAL	200	55.0	200	78.0	200	84.5	200	139.5	357.0
MEDIA/DEFECTO	0.275		0.39		0.4225		0.70		1.787

La calidad resultante de la evaluación en el sistema de secado solar caé en el nivel de DEFECTUOSA (Cuadro 14), ya que el valor de la sumatoria (2.2825) de las medias ponderadas de desclasificación la ubicaron en un rango de 2.01 a 3.00, (Cuadro 4), cuyas condiciones de secado son consideradas INADECUADAS.

Cuadro 14. Índice de calidad resultante en el secado solar.

SUMA DE MEDIAS PONDERADAS Grietas + Rajaduras + Alabeos	ÍNDICE DE CALIDAD	CONDICIONES DE SECADO
0.21 + 0.285 + 1.787 = 2.2825	DEFECTUOSA	INADECUADAS

En el Cuadro 15, se presenta la participación porcentual en la desclasificación de calidad de la madera por defectos.

Cuadro 15. Participación porcentual de desclasificación de la madera secada en secador solar.

DEFECTOS	FACTOR DE DESCALCIFICACIÓN (F.D)	%
ARQUEADURA	0.275	12.06
ENCORVADURA	0.390	17.11
TORCEDURA	0.420	18.42
ACANALADURA	0.700	30.70
SUBTOTAL	1.785	78.29
GRIETAS	0.210	9.21
RAJADURAS	0.285	12.50
SUBTOTAL	0.495	21.71
TOTAL	2.280	100.00

La mayor desclasificación de la madera, también se dió por la intensidad de los alabeos y dentro de estos, el defecto de acanaladura fue el de mayor influencia seguida de las torceduras, encorvaduras y arqueaduras.

Respecto a las rajaduras y grietas, la mayor incidencia en el sistema de secado solar, se debió a la intensidad de las rajaduras, aunque entre grietas y rajaduras, la diferencia es poca.

5.1.3. Madera secada en el secador convencional.

Se presentan los resultados de distribución de tablas (200) por grado de calidad y por repetición, ubicados de acuerdo a la intensidad del defecto en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Número de tablas distribuidas por grado de calidad, repetición y tipo de defecto en el secado convencional.

G R A D O								
DEFECTOS	1		2		3		4	
	REPETICIÓN							
	1	2	1	2	1	2	1	2
ARQUEADURA	34	37	65	65	0	0	0	0
ENCORVADURA	18	25	81	76	0	01	0	0
TORCEDURA	31	22	62	73	6	7	0	0
ACANALADURA	12	23	68	50	16	23	2	4
GRIETAS	84	80	9	13	1	5	5	4
RAJADURAS	44	72	25	16	13	10	17	4

A la suma de las tablas en ambas repeticiones ubicadas en los grados 2, 3 y 4, se les aplicó el factor de desclasificación correspondiente para obtener sus medias ponderadas, estos valores se presentan en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Índice de calidad de secado convencional respecto a grietas, rajaduras y alabeos.

INTENSIDAD(FD)	GRIETAS		RAJADURAS		ÍNDICE GRIETAS + RAJADURAS				
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD					
S/DEFECTO (0.0)	164	0.0	116	0.0	0.0				
LIGERO (0.05)	22	11.0	41	20.5	31.5				
REGULAR (2.00)	6	12.0	23	46.0	58.0				
INTENSO (2.50)	9	22.5	21	52.5	75.0				
TOTAL	202	45.5	202	119	164.5				
MEDIA/DEFECTO	0.226		0.592		0.818				
	ARQUEADURA		ENCORVADURA		TORCEDURA		ACANALADURA		ÍNDICE ALABEO
	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	Nº	Nº*FD	
S/DEFECTO (0.0)	71	0.0	43	0.0	53	0.0	35	0.0	0.0
LIGERO (0.05)	130	65.0	157	78.5	135	67.5	118	59.0	270.0
REGULAR (2.00)	0	0.0	1	2.0	13	26.0	39	78.0	96.0
INTENSO (2.50)	0	0.0	0	0.0	0	0.0	6	15.0	15.0
TOTAL	200	65.0	200	80.5	200	93.5	200	152	381.0
MEDIA/DEFECTO	0.323		0.40		0.465		0.756		1.944

La calidad resultante de la evaluación, en el secador convencional caé en el nivel de DEFECTUOSA (Cuadro 18), ya que el valor de la sumatoria (2.762) de sus medias

ponderadas de desclasificación, la ubicaron en un rango de 2.01 a 3.00 (Cuadro 4), cuyas condiciones de secado se consideran INADECUADAS.

Cuadro 18. Índice de calidad de secado convencional resultante.

SUMA DE MEDIAS PONDERADAS Grietas + Rajaduras + Alabeos	ÍNDICE DE CALIDAD	CONDICIONES DE SECADO
0.226 + 0.592 + 1.944 = 2.762	DEFECTUOSA	INADECUADAS

Se presenta la participación porcentual por desclasificación de calidad de la madera en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Participación porcentual de desclasificación de la madera secada en secador convencional.

DEFECTOS	FACTOR DE DESCLASIFICACION (F.D)	%
ARQUEADURA	0.323	11.69
ENCORVADURA	0.400	14.48
TORCEDURA	0.465	16.84
ACANALADURA	0.756	27.37
SUBTOTAL	1.944	70.38
GRIETAS	0.226	8.18
RAJADURAS	0.592	21.44
SUBTOTAL	0.818	29.62
TOTAL	2.762	100.00

En el secado convencional, la mayor desclasificación por defectos también se obtuvo en los alabeos o deformaciones y dentro de éstos, el defecto de acanaladura fue el de mayor influencia seguido por las torceduras, encorvaduras y arqueaduras en orden de la intensidad que presentaron.

Respecto a las rajaduras y grietas, este valor se considera alto, presentándose la mayor incidencia en las rajaduras más que en las grietas.

5.1.4. Comparación de calidad entre los tres sistemas de secado.

Los resultados de la participación porcentual por tipo de defecto y la clasificación de calidad de los tres sistemas de secado, se presentan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Comparación de calidad de secado entre sistemas.

SISTEMA	CALIDAD OBTENIDA	CONDICIONES DE SECADO	R + G (%)	A (%)	R + G + A (%)
AL AIRE	MALA	INADECUADAS	0.989 (31.39)	2.1575 (68.60)	3.1465 (100)
SOLAR	DEFECTUOSA	INADECUADAS	0.495 (21.71)	1.7875 (78.29)	2.2825 (100)
CONVENCIONAL	DEFECTUOSA	INADECUADAS	0.898 (29.62)	1.944 (70.38)	2.762 (100)

R:rajaduras, G:grietas, A: alabeos.

Al evaluar el apanamiento, las muestras utilizadas en los tres sistemas de secado no presentaron éste defecto (Figura 12).



Fig. 12. Muestras usadas para evaluar la presencia de apanamiento en los tres sistemas de secado.

Los valores del gradiente de humedad final, que indican la diferencia del CH entre las capas externas y la capa central de las muestras, se muestran en el cuadro 21 por repetición y por sistema de secado.

Cuadro 21. Resultados de gradientes de humedad por repetición y por sistema de secado.

MUESTRAS	A	B	C	D	E	F	G	H
SISTEMA	REPETICIÓN 1				REPETICIÓN 2			
AIRE	0.88	0.36	1.27	0.75	2.24	1.27	2.85	1.17
SOLAR	0.48	0.76	1.57	0.55	1.99	1.47	1.05	0.43
CONVENCIONAL	1.81	0.17	2.52	0.54	2.48	1.94	2.51	2.43

5.2. RITMO Y TIEMPOS DE SECADO.

5.2.1. Ritmo de secado.

Considerando los contenidos de humedad iniciales de cada una de las 4 muestras de secado de cada repetición, el Cuadro 22 muestra la velocidad de secado desde la condición verde hasta el 30% de humedad (pérdida de agua libre en la madera)-o en su defecto, hasta el valor más cercano- y desde el 30% hasta la humedad final alcanzada (pérdida de agua de imbibición de la madera).

Cuadro 22. Ritmos de secado de la madera. Porcentaje de contenido de humedad por hora.

DE VERDE AL 30% DE CONTENIDO DE HUMEDAD						
SISTEMA DE SECADO (TRATAMIENTO)						
	AL AIRE LIBRE		SOLAR		CONVENCIONAL	
REPETICIÓN	A1 ₍₄₎	A2 ₍₄₎	S1 ₍₄₎	S2 ₍₄₎	C1 ₍₄₎	C2 ₍₄₎
MEDIA/REPET.	0.061	0.059	0.120	0.095	0.265	0.334
MEDIA/SISTEMA	0.0599		0.1072		0.2993	
DE 30% AL 12% DE CONTENIDO DE HUMEDAD						
MEDIA/REPET.	0.0085	0.0092	0.0305	0.033	0.2197	0.197
MEDIA/SISTEMA	0.0088		0.0318		0.208	

(4) =Número de muestras.

Los valores del análisis de varianza para determinar la significancia estadística de las diferencias en el ritmo de secado, se presentan en el Cuadro 23.

Cuadro 23. ANDEVA del ritmo de secado. De verde hasta el 30% de contenido de humedad.

Fuente de variación.	grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F.	Prob>F
TRATAMIENTOS	2	0.2570901	0.1285450	93.18**	0.0001
ERROR	21	0.0289699	0.0013795		
TOTAL	23	0.2860597			

**altamente significativo.

Dado que se manifestó una diferencia altamente significativa entre ritmos de secado, se aplicó la técnica de comparación múltiple entre medias (Prueba de Tukey), la cual arrojó los valores presentados en el Cuadro 24.

Cuadro 24. ANDEVA del ritmo de secado. Desde 30% hasta el CH final alcanzado.

Fuente de Variación.	grados de libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F.	Prob>F
TRATAMIENTOS	2	0.1912661	0.0956331	212.98**	0.0001
ERROR	21	0.0094296	0.0004490		
TOTAL	23	0.2006957			

**altamente significativo.

Asimismo, se ilustran de manera gráfica los ritmos de secado en las Figuras 13 y 14.

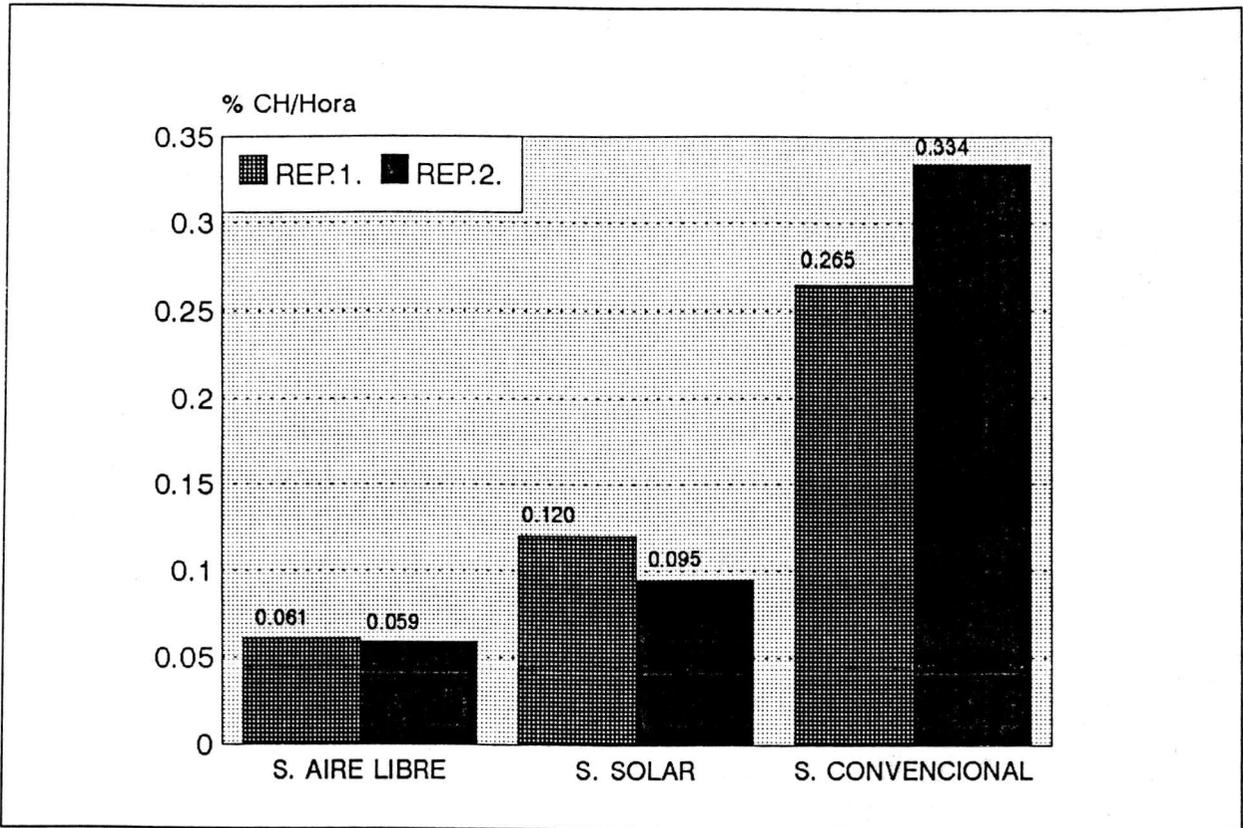


Fig. 13. Ritmos de secado de verde a 30% de CH en los tres sistemas. Pérdida de humedad por hora.

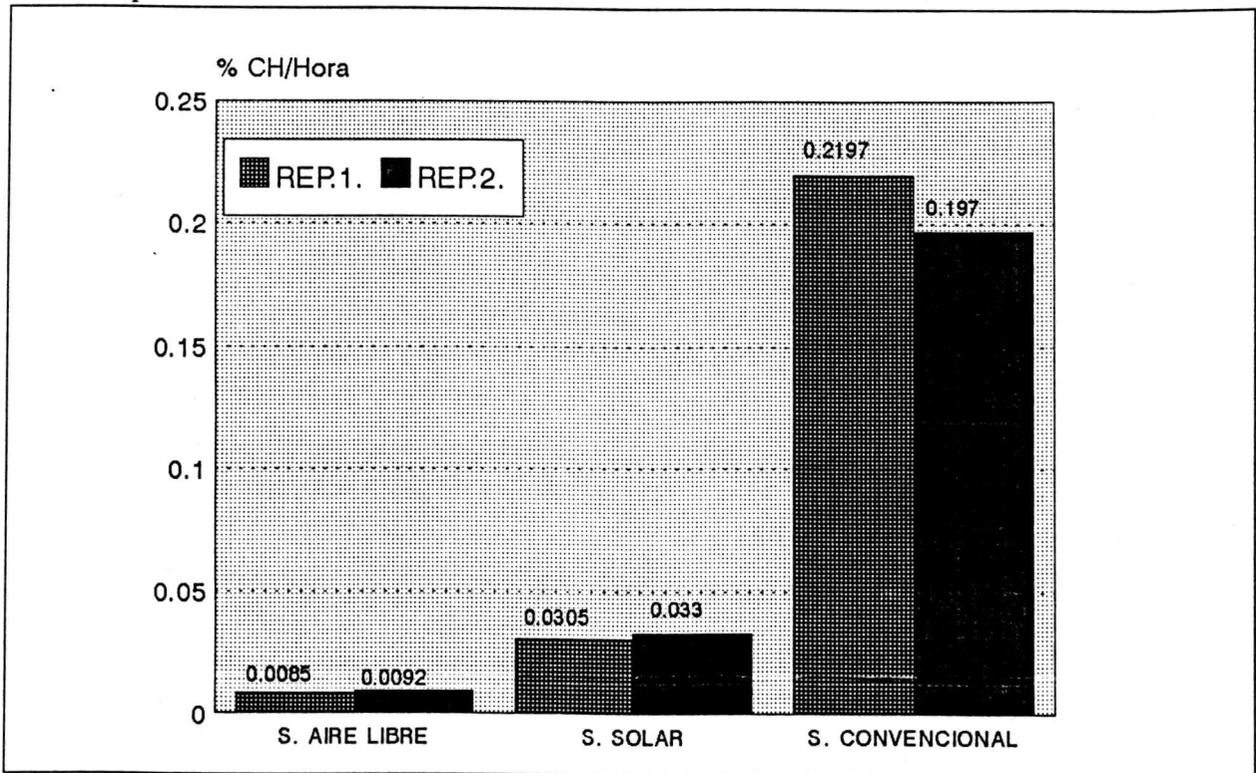


Fig. 14. Ritmos de secado de 30% al CH final alcanzado en los tres sistemas. Pérdida de humedad por hora.

5.2.2. Tiempos de secado.

5.2.2.1. Secado al aire libre.

La fecha de inicio del proceso de secado al aire libre fue del 23 de junio de 1995 para la primera repetición y del 28 de junio para la segunda, ambas llevadas hasta el 17 de octubre del mismo año, con un contenido de humedad inicial promedio de 64.50% y de 62.42% hasta un contenido de humedad final promedio de 14.11% y 13.04%. Los tiempos requeridos para llegar al equilibrio higroscópico con el ambiente fueron de 2640 horas (111 días) para la primera repetición y de 2780 horas (115.8 días) para la segunda.

Con la curva equivalente, el tiempo total de secado en el rango de humedad inicial y final de 63% al 12% fué de 3072 horas (128 días). Los datos entre los contenidos de humedad observados y los promedios generados de cada repetición son muy similares (Anexo IV). Los valores de los parámetros estimados mediante el procedimiento NO LINEAL con el paquete SAS para el ajuste del modelo 3 (curva equivalente), fueron los siguientes:

$$b = 0.0325133044, \quad c = 0.4897140635$$

La curva de secado con sus datos estandarizados a un contenido de humedad inicial de 63% y las curvas con los datos observados de cada repetición, se ilustran en la Figura 15.

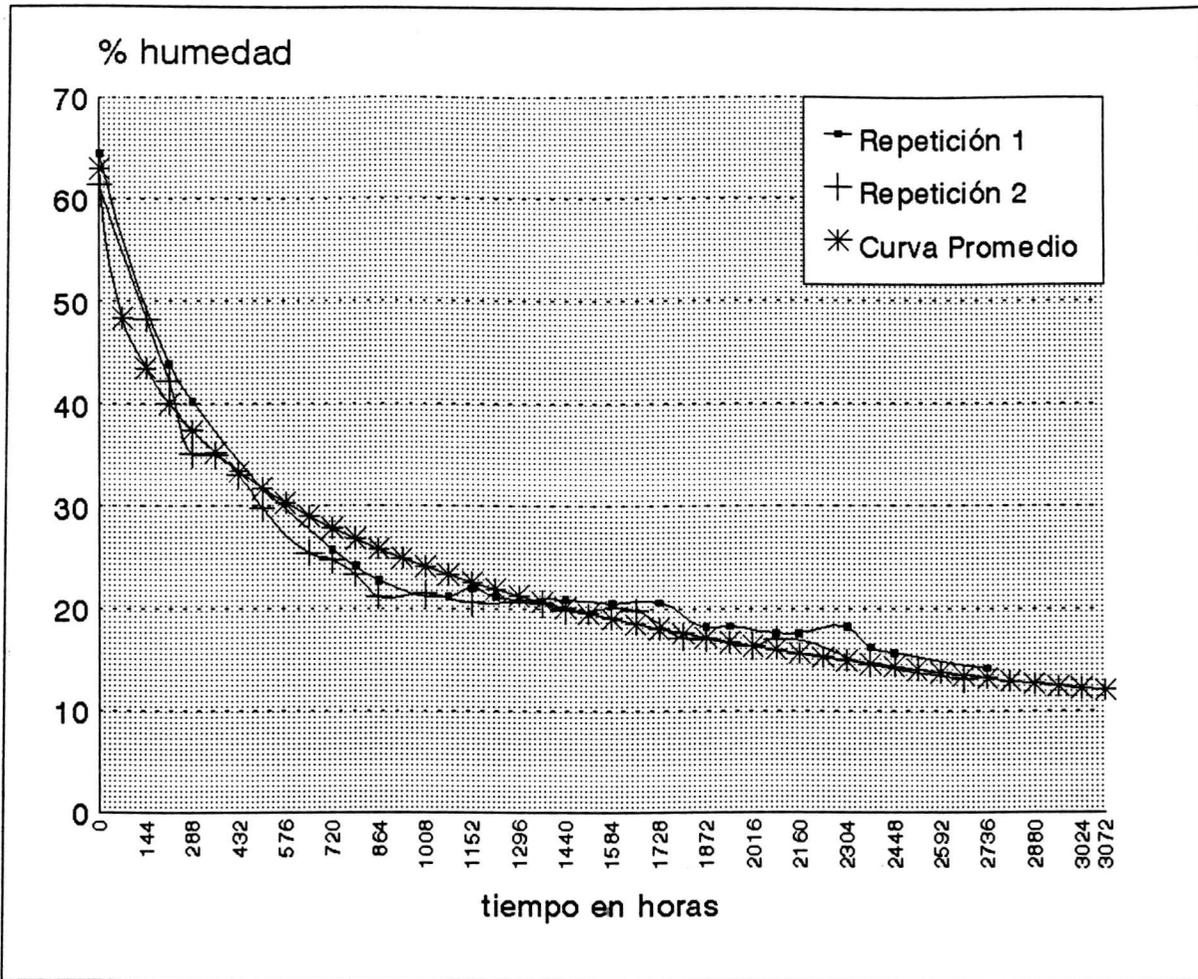


Fig. 15. Curva promedio y curvas por repetición de secado de la madera al aire libre.

5.2.2.2. Secado en secador solar.

En el secado solar, las dos repeticiones iniciaron el 5 de Julio de 1995 y finalizaron el 23 de agosto del mismo año, a partir de un contenido de humedad inicial promedio de 71.08% y 60.55% hasta un contenido de humedad final promedio de 12.43% y 11.75%, el tiempo total requerido para su secado con este rango de humedad fué de 1175 horas (49 días).

Con la curva equivalente de secado estandarizada a un CH inicial de 63% y final de 12% (modelo 2), el tiempo total de secado fué de 924 horas (38.5 días). Los datos entre los contenidos de humedad observados y los promedios generados de cada repetición fueron muy similares (Anexo V). Los valores de los parámetros estimados mediante el procedimiento NO LINEAL con el paquete SAS para el ajuste del modelo de la curva guía (b, c) y para generar la curva equivalente (w, a) fueron los siguientes:

$$b = 0.0133612044; \quad c = 0.7161497622; \quad w = 0.0016431907 \text{ y } a = 0.00170$$

Las curvas de secado de las dos repeticiones con sus datos estandarizados y la curva equivalente a un contenido de humedad inicial de 63%, se muestran en la Figura 16.

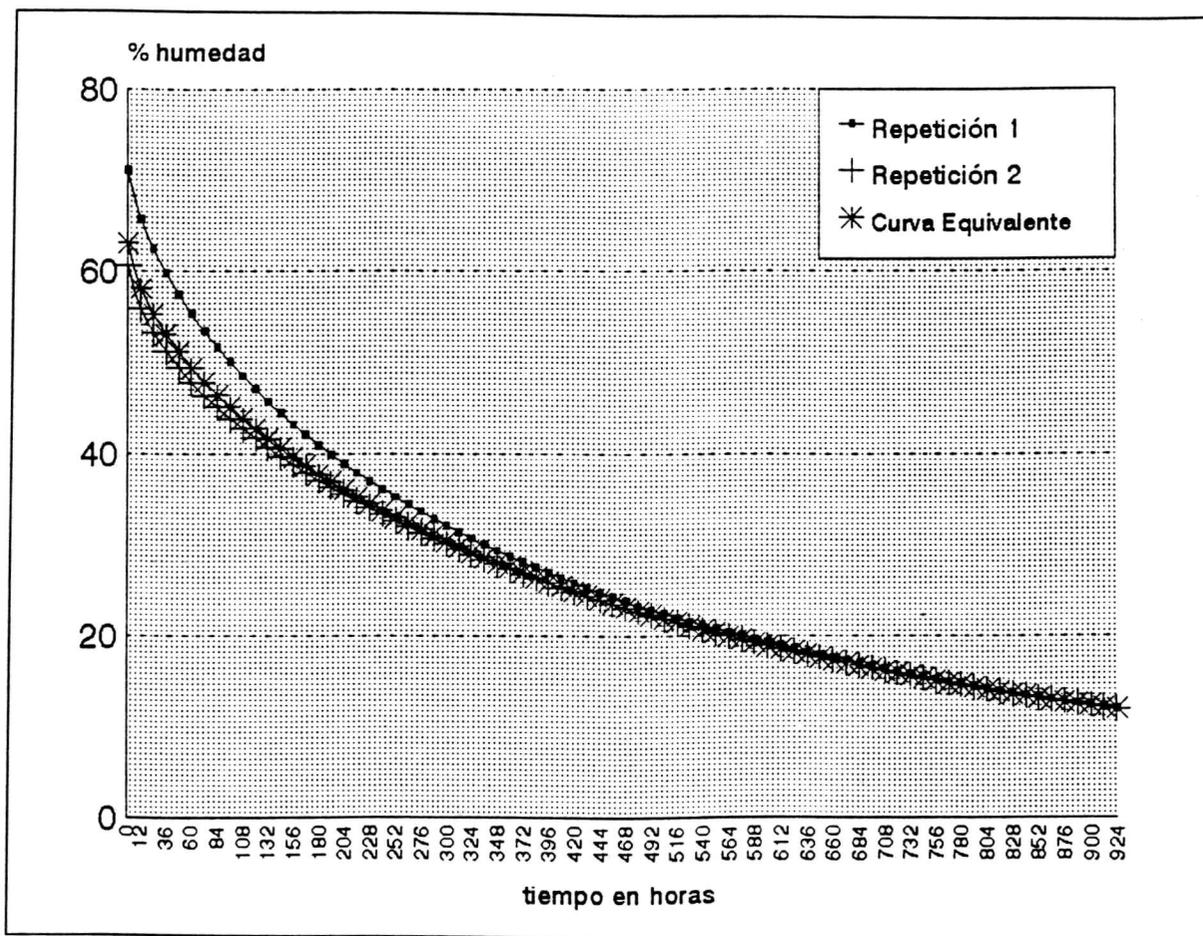


Fig. 16. Curvas de secado de la madera en secador solar.

5.2.2.3. Secado en secador convencional.

En el secado convencional, sin considerar las etapas de igualamiento y acondicionamiento, el período de secado de las dos repeticiones fue del 19 de septiembre al 29 de octubre de 1995. Los contenidos de humedad inicial promedio para las dos repeticiones fueron de 65.60% y de 60.61% llevadas a un contenido de humedad final promedio de 9.85% y de 9.44%, respectivamente, requiriendo ambas de 250.5 horas (10.4 días) de secado para esos rangos.

De la misma forma que en el secado al aire libre, con la curva equivalente (modelo 3), en el mismo rango de humedad: 63%-12% de CH inicial y final, respectivamente, el tiempo estimado total de secado fué de 234 horas (9.75 días). Los datos entre los contenidos de humedad observados y los promedios generados de cada repetición son muy similares (Anexo VI). Los valores de los parámetros estimados mediante un procedimiento NO LINEAL con el paquete SAS para ajustar el modelo de la curva equivalente (b y c), fueron los siguientes:

$$b = 0.001482987, \quad c = 1.287865250$$

La curva de secado con sus datos estandarizados a un contenido de humedad inicial de 63% y las curvas de cada repetición con los datos observados, se ilustran en la Figura 17.

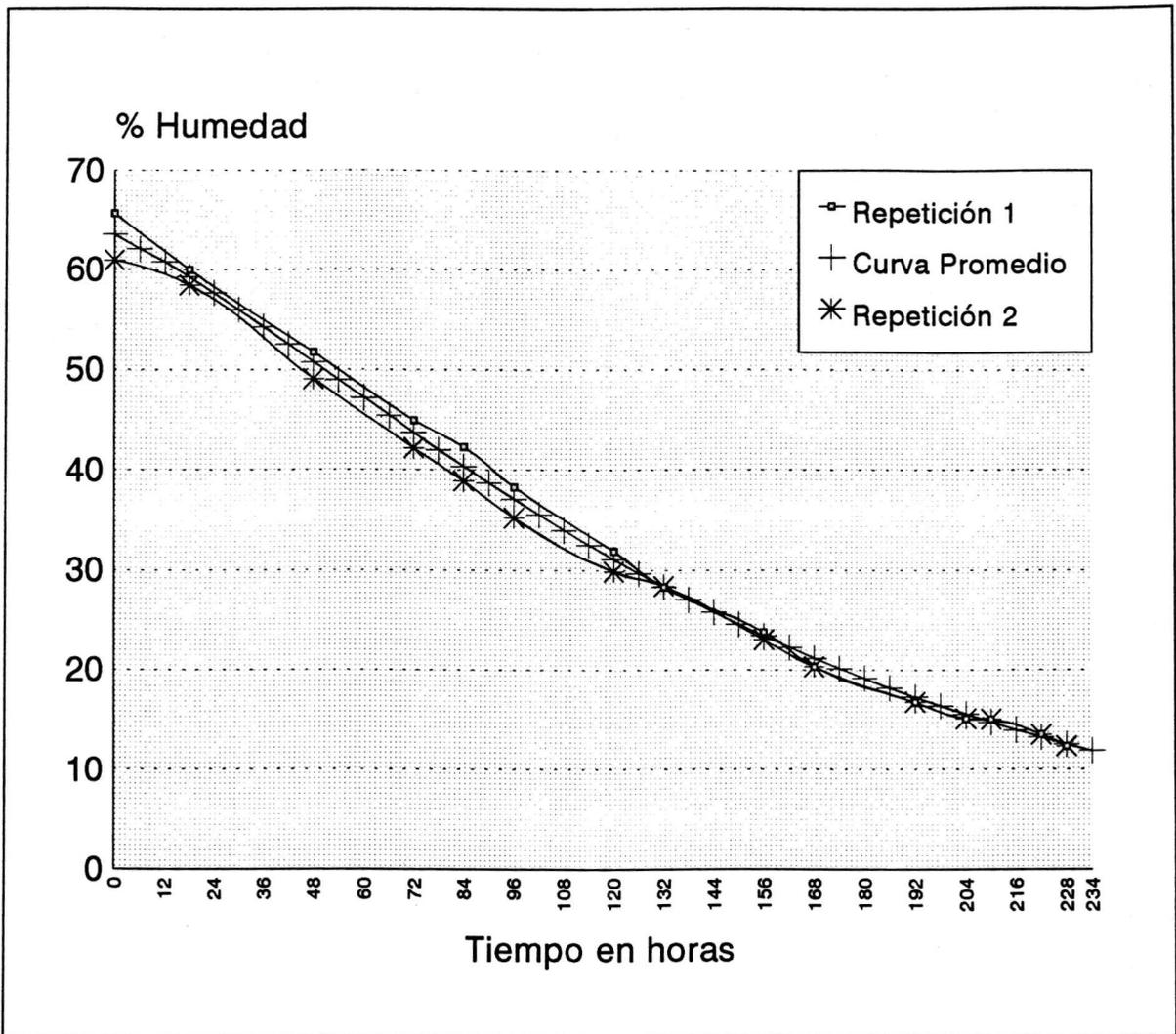


Fig. 17. Curva promedio y curvas por repetición de secado de la madera en el secador convencional.

5.2.2.4. Relación ajustada de tiempos de secado entre sistemas.

Los promedios del contenido de humedad inicial y final alcanzado por repetición y por sistema, así como los tiempos requeridos para su secado, se presentan en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Contenidos de humedad y tiempo real de secado por sistema.

SISTEMA	AL AIRE LIBRE		SOLAR		CONVENCIONAL	
	A1	A2	S1	S2	C1	C2
REPETICIÓN						
% CH inicial	64.5	62.42	71.08	60.55	65.6	60.61
% CH final	14.11	13.04	12.43	11.75	9.85	9.44
TIEMPO (Horas)	2640	2780	1175	1175	250.5	250.5

Se observa que el tiempo de secado requerido al aire libre fué mayor y menor en el secado convencional, con un tiempo de 3072 y 234 horas, respectivamente, en tanto que el proceso de secado solar requirió tan sólo de 924 horas para alcanzar el contenido de humedad final establecido (Cuadro 26).

Cuadro 26. Comparación de tiempos de secado estimados por sistema.

SISTEMA DE SECADO	% CH inicial	% CH final	Tiempo (horas)	Relación respecto al S. Convencional.
AL AIRE LIBRE	63	12	3072	13.13 veces
SOLAR	63	12	924	3.95 veces
CONVENCIONAL	63	12	234	

Las curvas equivalentes de secado en los tres sistemas, se muestran en la Figura 18.

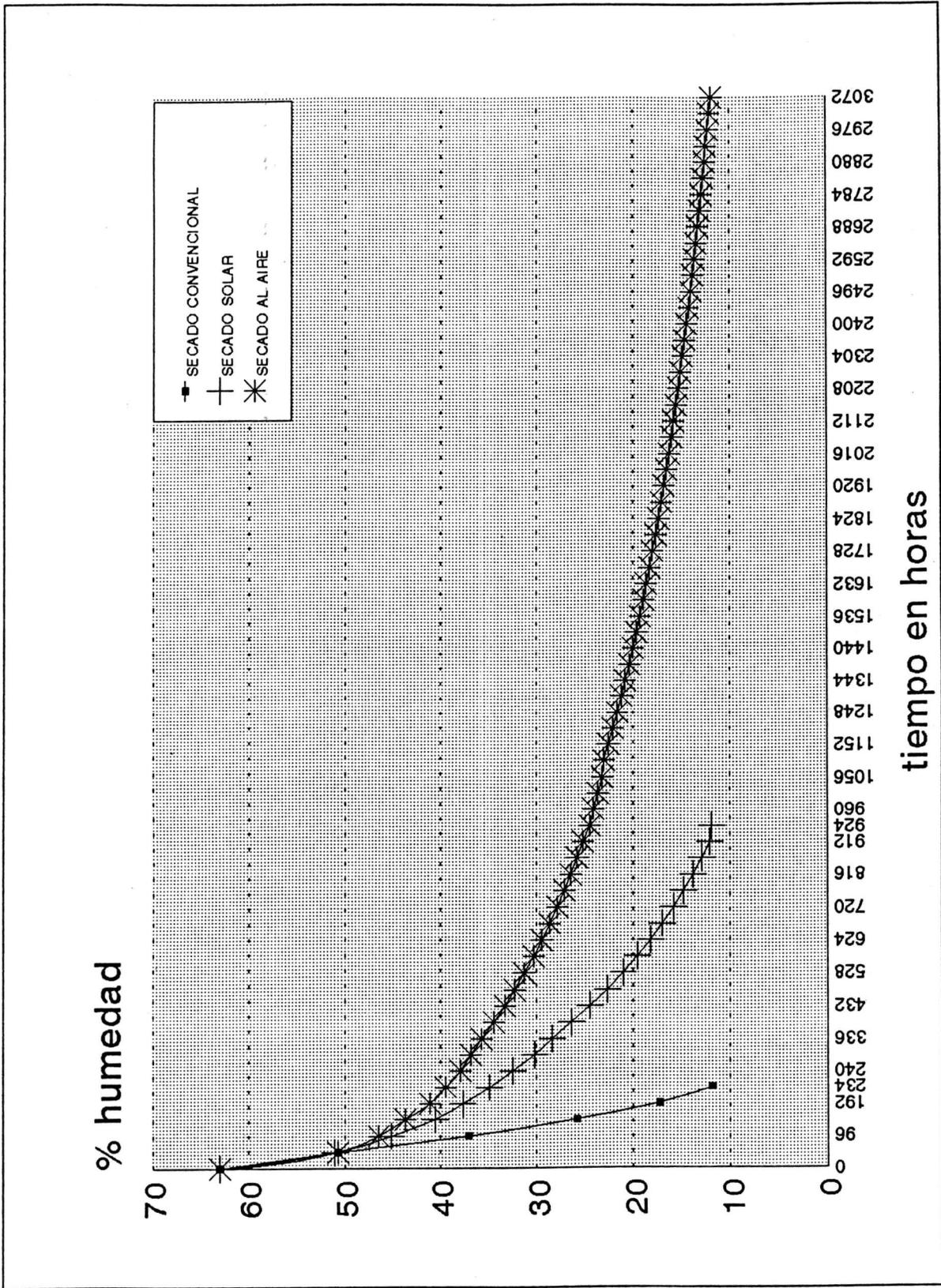


Fig. 18. Curvas equivalentes de secado en los tres sistemas.

5.3. COSTOS DE LOS PROCESOS DE SECADO POR SISTEMA.

Como se mencionó en la metodología, la comparación de los costos de secado en los tres sistemas se hizo mediante una estimación anualizada del volumen de madera aserrada, considerando como base la capacidad de un secador convencional de 25,000 pies-tabla.

5.3.1.- Costos del secado al Aire libre.

a). Contempla la inversión inicial de una empresa con capacidad de producción anual de 793.63m^3 (336,500 pies tabla) de madera aserrada de encino.

Dado que el apilado generalmente se realiza en forma manual, el cálculo se basó en la construcción de pilas pequeñas para secar un volumen de mil pies tabla con las dimensiones de 1.20m x 1.50m x 2.44m (ancho x alto x largo), ya que se consideran aceptables y de fácil manejo.

Estimando 128 días de secado para un CH inicial promedio de 63% al 12% de CH final, se pueden realizar 2.85 secados al año (365 días), por lo que, para el volumen anual de producción estimado se necesitarían 118.01 pilas. La construcción de cada pila requiere del siguiente material: 5 polines para las bases (3 de 0.12 m x 0.12 m x 2.44 m y 2 de 1.20 m de largo), 136 separadores de 3/4" de espesor por 2.54 cm de

ancho por 1.20 m de largo con 3 láminas acanaladas galvanizadas para el techo lo cual da un costo por pila de \$574.00. El costo de inversión estimado es:

$$I = \$ 67,737.92$$

b). El porcentaje anual de depreciación para los rubros considerados en la inversión se fijó para un período de 5 años:

$$F1 = 20\%/año.$$

c). El volumen de madera a secar por año es:

$$Vm = 793.63 \text{ m}^3/año.$$

d). Se consideró la tasa real actual de interés anual:

$$i = 8\%/año.$$

e). El área del patio de secado, incluidas las vías de acceso para el transporte y maniobras fue de:

$$Ap = 6300 \text{ m}^2.$$

f). En el costo del terreno para el patio de secado, debido a que se consideran activos fijos, no presentan depreciación y su precio varía de acuerdo a la localidad geográfica. Se consideró para este rubro el costo del predial para uso industrial, ya que representan un gasto fuerte que debe incluirse en el costo total del secado:

$$K1 = \$1.10/\text{m}^2.$$

g). El precio por m^3 rollo de madera de encino es de \$340.00 incluido el costo de transporte. Considerando un coeficiente de aserrío del 45%, 1000 pies tabla de madera aserrada requieren $5.56 \text{ m}^3 \times \$340.00 = \$1890.40$. Si el costo de aserrado es de \$460.00 por

millar de pies-tabla, esto es igual a \$2350.40 dividido por la cantidad de madera necesaria para 1 m³ aserrado (2.3585 m³ rollo), el costo total es: **Pm = \$996.57/m³.**

h). La duración del secado de la madera con un CH inicial promedio de 63% al 12% de CH final. **Ts = 4.267 meses.**

i). El porcentaje de pérdidas de madera durante el secado, se estimó de acuerdo con el grado de calidad obtenido en éste experimento. Si al inicio no existen pérdidas por defectos de secado, toda la madera tendría una calidad de excelente (100%). Si al final del proceso, toda se clasificara con una calidad de muy mala (último grado de la clasificación empleada en este estudio), su costo final de venta sería equivalente al 50% de su costo real, lo que nos representaría una pérdida del 50%. La clasificación presentada en el Cuadro 4 muestra 7 niveles, sin considerar el grado 1 que corresponde a la calidad de excelente, cada uno representa el 7% de desclasificación. En este estudio, la calidad de la madera se clasificó en un grado 6, por lo que el valor correspondiente a las pérdidas fué de: **Pw = 43.0%.**

j). Se estimó el salario de 2 peones para realizar las actividades de apilado y desapilado de la madera con turnos de 8 h de trabajo, incluyendo las prestaciones sociales, con un monto de \$395.00 semanales por persona: **L = \$9.89/hora.**

k). El costo de administración por m³ de madera, contempla los costos de papelería para el control y registro del secado, combustible adicional, alumbrado de áreas y el costo por comisión por venta, calculado sobre el costo total de secado. $C_a = 15\%/m^3$

En este sistema de secado, se consideró que los porcentajes obtenidos para las siguientes clases de calidad fueron: selecta 15%, No.1 y común 25% y de tercera 60%.

Cuadro 27. Resultados de costos de secado al aire libre por unidad de volumen.

C O N C E P T O	COSTO
1. Depreciación sobre inversiones: $(I \times F1)/(V_m \times 100)$ $(67,737.92 \times 20\%)/(793.63 \times 100)$	\$17.07/m ³
2. Interés sobre la inversión: $(I \times i)/(V_m \times 100) = (\$67,737.92 \times 8\%)/(793.63 \times 100)$	\$6.83/m ³
3. Interés sobre costos del terreno: $(A_p + K1 \times i)/(V_m \times 100) = (6300 \times \$1.10 \times 8\%)/(793.63 \times 100)$	\$0.70/m ³
4. Interés sobre el capital circulante: $(P_m \times T_s \times i)/(12 \times 100) = (\$340.0 \times 4.267 \times 8\%)/(1200)$	\$28.35/m ³
7. Costo de mano de obra-apilado: $(T_a \times L)/60 = (40 \text{ min} \times \$9.89/\text{hora})/60$	\$6.59/m ³
8. Costo de mano de obra-desapilado: $(T_d \times L)/60 = (30 \text{ min} \times \$9.89/\text{hora})/60$	\$4.95/m ³
9. Valor p/pérdidas de madera: $(P_m \times P_w)/100 = (\$996.57 \times 43\%)/100$	\$428.53/m ³
Costo total del secado al aire libre:	\$493.01/m³ \$1.16/pt
Costo total sin considerar las pérdidas de madera por desclasificación.	\$64.48/m³ \$0.15/pt
Costo de administración/m ³ (C _a): $(\text{Costo total de secado} + P_m) \times 15\%$	\$223.44/m ³
Costo total de la madera secada (C_{ms}) $(\text{Costo total del secado al aire libre} + P_m + C_a)$	\$1713.01/m³ \$4.04/pt

5.3.2. Costos del secado solar.

Para secar un volumen de madera igual a 793.63 m³ anuales, en secadores solares cuya capacidad de secado es de 2500 pies tabla de madera aserrada, con un CH inicial promedio de 63% hasta un CH final promedio de 12% en los meses de julio a agosto, cada carga requiere de 38.5 días de secado. Con este tiempo estimado, podríamos secar al año (365 días) bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura de la época, 9.48 cargas.

a). La construcción e instalación de un secador solar con la capacidad señalada, incurre en los siguientes costos: la construcción, base de concreto, polietileno transparente para recubrimiento de paredes, bastidores de madera, ventiladores axiales, psicrómetro para registrar las temperaturas, y de polines para las bases de 2 pilas con sus separadores. Para secar el volumen anual, se requieren 14.20 secadores, por lo tanto, el costo de inversión inicial calculado fue:

$$I = \$276,381.75$$

b). El porcentaje anual de depreciación estimado de los rubros considerados en la inversión, base 10 años:

$$F1 = 10\%/año.$$

c). El volumen de madera a secar por año en el secador, se fijó con base en su capacidad de secado:

$$V_m = 793.63 \text{ m}^3/año.$$

d). Se consideró la tasa real actual de interés anual:

$$i = 8.0\%/año.$$

e). Área total que ocupa el secador (35.75 m² de cada uno), considerando calles y áreas de carga y descarga de la madera, para 14.38 secadores es: **As = 1790.0/m².**

f). En el costo del terreno que ocupa el secador solar también se consideró el costo anual del predial: **K1 = \$1.10/m².**

g). Se estimó la potencia requerida de los ventiladores, considerando el voltaje de los motores y la corriente en amperes durante el tiempo de operación, se aplicó la siguiente fórmula: **$P = (\sqrt{3} * E * I * \text{Cos}\phi) * 1.1$**

Donde:

P=Potencia de los motores en watts;

E=Voltaje de los motores=220 volts.

I=Corriente de los motores= 3.2 Amper's.

Cosφ = 0.8 Factor de potencia.

$$Nw = (1.7320 * 220 * 3.2 * 0.8) * 1.1 = 1073.04 \text{ Watts} = 1.073 \text{ Kw.}$$

h. Consumo de energía de los ventiladores expresado como un porcentaje de la potencia del motor. Si el consumo de energía/hora es equivalente a 1.073 Kw/h, y los ventiladores trabajaron en forma continua durante 11 horas diarias, esto nos representa un consumo igual al 100%/hora: **Y = 100.00%.**

i). El costo de la energía por Kwh: **Pe = \$0.70/Kwh.**

j). El precio por m^3 rollo de madera de encino es de \$340.00 incluido el costo de transporte.

Considerando un coeficiente de aserrío del 45%, 1000 pies tabla de madera aserrada requieren $5.56 m^3 r \times \$340.00 = \1890.40 . Si el costo de aserrado es de \$460.00 por millar de pies-tabla, esto es igual a \$2350.40 dividido por la cantidad de madera necesaria para $1 m^3$ aserrado ($2.3585 m^3$ rollo), el costo total es: **$P_m = \$996.57/m^3$** .

k). Capacidad de secado en volumen de madera: **$V_s = 5.896m^3$** .

l). La duración promedio del período de secado de la madera se estimó en: **$T_s = 38.5$ días.**

m). El porcentaje de pérdidas de madera durante el secado, se estimó con los resultados de desclasificación de la madera obtenida en este estudio, ubicándose en el grado 5, por lo que la pérdida de madera fue: **$P_w = 35.0\%$** .

n). Se estimó el salario de 2 peones para las actividades de apilado y descarga de la madera, con turnos de 8 horas por semana incluyendo las prestaciones sociales: **$L = \$9.89/hr$** .

o). El costo por administración por m^3 de madera, contempla los costos de papelería para el control y registro del secado, gastos de combustible adicional, gastos de alumbrado y un costo de comisiones por venta, calculado sobre el costo total de secado.

$Ca = 15\%/m^3$.

En este experimento, se consideró que los porcentajes obtenidos para las siguientes clases de calidad fueron: selecta 20%, No.1 y común 35% y de tercera 45%.

Cuadro 28. Resultados de costos del secado solar por unidad de volumen.

C O N C E P T O	C O S T O
1. Depreciación sobre inversiones: $(I \times F1) / (V_m \times 100)$ $(\$276,381.75 \times 10) / 79363$	\$34.83/m ³
2. Interés sobre la inversión: $(I \times i) / (V_m \times 100)$ $\$276,381.75 \times 8) / (79363)$	\$27.86/m ³
3. Interés sobre costos del terreno: $(A_s + K1 \times i) / (V_m \times 100) = (1790.0 \times \$1.10 \times 8\%) / 79363$	\$0.20/m ³
4. Interés sobre el capital circulante: $(P_m \times T_s \times i) / (12 \times 100) = (\$996.57 \times 1.28 \times 8\%) / (1200)$	\$8.53/m ³
5. Costo de consumo de energía/m ³ : $(N \times W \times 12 \times T \times s \times Y \times P_e) / (V_s \times 100)$ $(1.073 \times 12 \times 38.5 \times 100 \times 0.70) / 590$	\$58.85/m ³
6. Costo de mano de obra-apilado: $(T \times a \times L) / 60 = (40 \times 9.89) / 60$	\$6.59/m ³
7. Costo de mano de obra-desapilado: $(T_d \times L) / 60 = (30 \text{ min} \times \$9.89/\text{hora}) / 60 =$	\$4.95/m ³
8. Valor por pérdidas de madera: $(P_m \times P_w) / 100 = (\$996.57 \times 35\%) / 100 =$	\$348.80/m ³
Costo total del secado solar:	\$490.60/m³ \$1.16/pt
Costo total del secado solar sin pérdidas de madera:	\$141.80/m³ \$0.33/pt
Costo de administración/m ³ (Ca): $(\text{Costo total de secado} + P_m) \times 15\%$	\$223.08/m ³
Costo total de la madera secada. $(\text{Costo total de secado solar} + P_m + C_a).$	\$1710.25/m³ \$4.03/pt

5.3.3.- Costos del secado en secador convencional.

Considerando una capacidad del secador convencional de 25,000 pies tabla y que se requiere un tiempo de 26 días para su secado, al año sólo se podrían secar 13.46 cargas, lo

que nos daría un volumen anual de madera seca equivalente a 336,500 pies tabla, o bien 793.63 m^3 .

a). El costo de inversión considerado consistió del siguiente equipo: Adquisición de un secador preconstruido con capacidad para 25 MPT de madera aserrada, que incluye la cámara de secado con sistema de control, gastos de transporte e instalación de equipo, más el costo de la caldera y el sistema de instalación eléctrica, que hacen un monto total de: **$I = \$1,205,925.00$**

b). Se estimó una vida útil de 30 años del equipo, obteniéndose el porcentaje anual de depreciación de: **$F1 = 3.33\%/año.$**

c). El volumen de madera a secar/año: **$Vm = 793.63 \text{ m}^3/año.$**

d). Se empleó la tasa real actual de interés anual: **$i = 8.0\%/año.$**

e). Se determinó el área requerida para el secador y el patio de recepción de la madera: **$As = 1100.0 \text{ m}^2.$**

f). Al igual que en los sistemas anteriores, en el rubro de costo del terreno del secador, se consideró el costo del predial por año para uso industrial: **$K1 = \$2.53/ \text{m}^2.$**

g). Se calculó la extracción promedio de humedad por m³ de madera.

$$W=(\text{Kg agua/m}^3); W=((\text{CHi}-\text{Chf})/100)\times \text{Densidad básica (Po/Vv)}=$$

$$(63-9.65)/100 = 0.5335 \times 650 = 346.78 \text{ Kg de agua/m}^3.$$

h.-Consumo promedio de combustible/año/Kg de agua extraída. Si la pérdida de humedad=53.35%; la densidad básica de la madera de estos encinos es de 650 Kg/m³; y la extracción de humedad/m³ (W) de madera seca es de 346.78 Kg de agua/m³, entonces: $W \times V_m = 346.78 \times 793.63 \text{ m}^3 = 275,211.04 \text{ Kg de agua extraída por año}$. Si en promedio se consumen anualmente 24,260.75 galones de combustible, se tiene un consumo de combustible por kilogramo de agua extraída de:

$$Q = 24,260.75 / 275,211.04 = 0.09 \text{ gal/Kg agua.}$$

i). Se utilizó el precio del combustible por galón de diesel y gasóleo, durante el proceso de secado: $P_q = \$3.757/\text{galón gasóleo.}$ y $P_q = \$7.1402/\text{galón diesel.}$

j). Se estimó la potencia requerida de los ventiladores durante el secado. Considerando el voltaje de los motores y la corriente en amperes durante el tiempo de operación, aplicándose la siguiente fórmula: $N_w = (\sqrt{3} \cdot E \cdot I \cdot \text{Cos}\phi) \cdot 1.1$

Donde: N_w =Potencia de los motores en watts; E =Voltaje de los motores=220 volts.

I =Corriente de los motores= 40.0 Amperes; $\text{Cos}\phi = 0.8$ Factor de potencia.

$$N_w = (1.7320 \cdot 220 \cdot 40 \cdot 0.8) \cdot 1.1 = 13413.00 \text{ watts} = 13.41 \text{ Kw.}$$

k). Se determinó el consumo de energía de los ventiladores como un porcentaje de la potencia de los motores. De esta manera, si 1 HP=746 watts, el consumo de energía por hora es de 746 Kw/h. Por otro lado, si los ventiladores solo trabajaron 50 minutos de cada hora, este tiempo de operación nos representa un consumo igual a 83.33%/hora, de ahí que: $Y = 83.33\%$

l). El costo de la energía. $P_e = \$0.70/\text{Kwh}$

m). El precio de la madera de encino se calculó en la misma forma que en los dos sistemas anteriores, incluyendo los costos de transporte y de aserrío: $P_m = \$996.57/\text{m}^3$.

n). Tiempo estimado de secado de la madera. $T_s = 26 \text{ días.}$

o). Capacidad del secador en volumen de madera: $V_s = 58.96 \text{ m}^3$.

p). El porcentaje de pérdidas de madera durante el período de secado, de acuerdo con el grado de desclasificación de madera que se obtuvo, se ubicó en nivel 5, por tanto, el porcentaje de pérdidas fue: $P_w = 35.0\%$.

q). Los salarios se fijaron en función del número de peones requeridos para realizar las actividades de apilado y descargue de la madera (2 personas), con turnos de 8 horas

por semana, un fogonero por 24 hs. (3 personas) y un encargado del área de secado, se incluyen en este rubro las prestaciones sociales: **L = \$9.89/hora**

r). El costo por administración por m^3 de madera, contempla los gastos de papelería para el control y registro del secado, gastos de combustible adicional para el montacargas, gastos de alumbrado y el costo de comisión por ventas, calculado sobre el costo total de secado. **Ca = 15%/m³**

s). El costo por uso de combustible, se estimó como un porcentaje del costo total del combustible utilizado por m^3 de madera, estimando el nivel de contaminación generado en cada caso (gasóleo o diesel). Si el gasóleo tiene un costo más bajo, se debe suponer que el nivel de contaminantes que genera es más alto, por lo tanto el porcentaje por usarlo debe ser mayor.

$$C_c = 45\%/galón\ gasóleo/m^3 \text{ y } C_c = 30\%/galón\ diesel/m^3.$$

En este experimento los porcentajes obtenidos para las siguientes clases de calidad fueron: selecta 20%, No.1 y común 30% y de tercera 50%.

Cuadro 29. Resultados de costos del secado convencional por unidad de volumen.

C O N C E P T O	COSTO
1. Depreciación sobre inversiones. $(IxF1)/(Vmx100)$ $DI = (1,205,925.00 \times 3.33)/(79363)$	\$50.60/m ³
2. Interés sobre la inversión: $II=(Ixi)/(Vmx100)=(\$1,205,925x8)/(79363)$	\$121.56/m ³
3. Interés sobre costos del terreno: $It=(As+K1xi)/(Vmx100)=(1100.0x\$2.53x8\%)/(79363)$	\$0.28/m ³
4. Interés sobre el capital circulante: $Ic=(Pm \times Ts \times i)/(12x100)=(\$996.57x0.8667 \times 8\%)/(1200)$	\$5.76/m ³
5. Costo de diesel o energía: $Cq=W \times Q \times Pq = 346.78x0.09x7.1402)$	\$218.27/m ³
6. Costo de consumo de energía/m ³ : $Ce= (NWx24xTsxYxPe)/ (Vsx100)=$ $(13.41x24x26x83.33x0.70)/5896$	\$41.40/m ³
7. Costo de mano de obra en el apilado: $Ca=(TaxL)/60=(20x9.89)/60$	\$3.30/m ³
8. Costo de mano de obra en el desapilado: $Cd=(TdxL)/60=(15x9.89)/60$	\$2.47m ³
9. Valor p/pérdidas de madera: $Vp=(PmxPw)/60=(996.57x35)/100$	\$348.80/m ³
Costo total del secado convencional: CT=(DI+II+It+Ic+Cq+Ce+Ca+Cd+Vp)	\$792.44/m ³ \$1.87/pt
Costo total sin considerar las pérdidas de madera por desclasificación.	\$443.64/m ³ \$1.05/pt
Costo de administración/m ³ : $Ca=(CT + Pm) \times 15\%$	\$278.17/m ³ .
Costo por uso de combustible/ m ³ : $Cc=(Cq \times 30\%)/100$	\$65.48/gal/m ³
Costo total de la madera secada : Cms=(CT + Pm + Ca + Cc).	\$2132.66/m ³ \$5.03/pt

5.3.4. Costos comparativos entre los tres sistemas de secado.

La comparación de los costos de secado por m³ y por pie-tabla se presentan en el

Cuadro 30. Los costos de utilizar gasóleo como combustible, se presentan en el anexo 7.

Cabe resaltar que tanto en el secado al aire libre como en el secado solar, se obtuvieron

costos de secado iguales (**\$1.16/pt**), que considerando un porcentaje del 100% para el secado convencional por ser el costo más alto(**\$1.17/pt**), tan sólo representan el 62.0% de éste.

Cuadro 30. Comparación de costos de secado por sistema, por m³ y por pie-tabla.

SISTEMA DE SECADO	Costo \$/m ³	Costo* \$/m ³	Costo \$/pt	Costo*\$/pt
AL AIRE LIBRE	493.01	64.48	1.16	0.15
SOLAR	490.60	141.80	1.16	0.33
CONVENCIONAL	792.44	443.64	1.87	1.05

*Costos estimados sin considerar el volumen de pérdidas de madera por desclasificación de calidad.

Los costos comparativos de la madera seca incluyendo el costo por uso de combustible y el costo de administración así como su relación beneficio-costo para los tres sistemas de secado, se presentan en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Costo de la madera seca y su relación beneficio-costo.

SISTEMA	COSTO/m3	COSTO/pt	Relación Beneficio/Costo
AL AIRE	1,713.01	4.04	4,515.6 / 1,713.01 = 2.63106
SOLAR	1,710.25	4.03	6,211.6 / 1,710.25 = 3.63199
CONVENCIONAL	2,132.66	5.03	7,144.4 / 2,132.66 = 3.34999

6. ANALISIS Y DISCUSIÓN.

6.1. CALIDAD DE SECADO.

Los índices de calidad resultantes de los sistemas de secado al aire libre, solar y convencional, se reportan en los Cuadros 10, 14 y 18. La calidad de la madera en los tres sistemas fué evaluada con respecto al contenido de humedad final alcanzado y la intensidad de los defectos presentados conforme a la clasificación dada por Kauman y Mittak (1966). La madera se califica como DEFECTUOSA (nivel 6, Cuadro 4) tanto en el secado solar como en estufa convencional y MALA (nivel 7, Cuadro 4) en el secado al aire libre. Estas diferencias no son tan significativas entre los tres sistemas, sin embargo la calidad de la madera resultó mejor en el secado solar, siguiéndole el secado convencional y finalmente el secado al aire libre, lo anterior se explica por lo señalado por Schniewind, (1960) y Bachrich, (1980) en torno a los esfuerzos internos que se desarrollan en la madera como resultado de las contracciones desiguales que se presentan en una pieza de madera por efecto de la pérdida de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra (PSF) de manera que los defectos como las rajaduras, grietas, apanalamiento y colapso, son productos de excesivos esfuerzos de secado que se dan durante el proceso.

En el secado convencional que se aplica a nivel comercial, la industria maderera reporta un porcentaje de desclasificación de la madera de encino del orden de 40-50%¹, por

¹ Información verbal obtenida por industriales madereros.

lo que el nivel de clasificación aquí obtenido (aproximadamente de 30-40%) se considera bueno dentro del rango común.

Las experiencias obtenidas por Rodríguez *et al.* (1989) en relación a la calidad del secado solar y al aire libre con madera de encino, fueron similares a las obtenidas en este experimento. También coinciden con los reportados por Peck (1962), Bois (1977), Plumptre (1979), Tschernitz y Simpson (1979), Chen (1981), Oliveira *et al.* (1982), Martínez *et al.* (1984), Ávila (1985), Bejar (1985), Kunze y Hermosillo (1985) y Alvarez y Fernández-Golfín (1990), quienes, de manera general, califican a la madera secada en secador solar como de mejor calidad en relación con el secado al aire libre y convencional, sin otorgar un nivel específico de calidad.

Los porcentajes de desclasificación resultantes por tipo de defecto en cada sistema de secado, se reportan en los Cuadros 11, 15 y 19. El defecto de mayor influencia en la desclasificación de los tres sistemas fue el de acanaladura (alabeo), con una participación total de: 43.8%, 30.7% y 27.4% para el secado al aire libre, en secador solar y en estufa convencional, respectivamente. Ello puede explicarse por la muy alta relación de anisotropía que poseen las especies (valores mayores a 2.3 reportados por Fuentes (1990) para *Quercus laurina*, *Q. crassifolia* y *Q. affinis*, que provoca en la madera una tendencia natural al acanalamiento cuando ésta pierde humedad por debajo del punto de saturación de la fibra (30%).

En el secado al aire libre, la diferencia de calidad con respecto al secado solar y al convencional también pudiera verse influido por el tiempo tan prolongado de secado en donde la madera se degradó más por efecto de las fluctuaciones en la temperatura y humedad relativa ya la lluvia y los rayos solares incidieron directamente en los extremos de las tablas y por la falta de sobrepesos sobre las pilas de madera, que en los otros dos sistemas sí se colocaron como una forma de contrarrestar principalmente el acanalamiento. Esta es una diferencia y práctica normal en la industria maderera.

El efecto de las grietas y rajaduras fue menor en el secado solar que en el convencional y al aire libre, observándose de manera general con una participación porcentual alta, siendo mayor en el secado al aire libre (31.39%), donde el mayor porcentaje es atribuible a grietas. En el secado convencional la participación correspondiente a estos defectos también se considera alta (29.62%), donde el mayor porcentaje es atribuible a rajaduras, mientras que en el secado solar, la participación porcentual fue menor (21.71%) y la proporción porcentual con que se presentaron tanto las grietas como las rajaduras fue muy similar, siendo ligeramente mayor en éstas últimas.

El alto porcentaje obtenido de grietas y rajaduras, se debe a las contracciones altas de la madera en su plano tangencial principalmente y a los grandes rayos que las especies presentan, pues al desarrollarse los mayores esfuerzos de tensión perpendicular en la zona exterior de las tablas, éstos esfuerzos rebasan la resistencia mecánica de la madera ocasionando la manifestación de una serie de grietas y rajaduras superficiales, que se

presentan en las zonas de mayor debilidad como son los radios medulares, que en los encinos, de su volumen de madera constituyen más del 32% (Gaby, 1963), aunque Borja (1991), reporta para *Quercus laurina* un volúmen de 9.42%.

El defecto de apanalamiento no se presentó en ninguna de las muestras predeterminadas y evaluadas en los tres sistemas de secado, se considera que se debe al empleo de bajas temperaturas en la eliminación del agua libre de la madera y a que el diferencial en el gradiente de humedad existente en las tablas del centro hacia la superficie no fué muy alto. Al aire libre la temperatura máxima de bulbo seco fué de 40°C y humedad relativa de 58%. Para el secado solar, la temperatura máxima del bulbo seco fue de 45°C y una HR de 68.5%. En el secado convencional la temperatura máxima registrada del bulbo seco fue de 65.55°C y la HR de 67.5%.

Las condiciones fluctuantes en la temperatura (de 10 a 40°C) con humedades relativas bajas (de 53 a 80%) y velocidad del aire en promedio altas (mayor a 2.0 m/seg), afectaron el secado al aire libre. Estos factores secantes de manera conjunta aceleraron la tasa de evaporación de humedad, que pudieron haber provocado gradientes de humedad más altos que en los otros dos sistemas de secado, incidiendo en la mayor intensidad de grietas y rajaduras en los extremos de las tablas, lo que influyó en la calidad obtenida en el secado al aire libre y que comparativamente, resultó ser la más baja entre los tres sistemas.

En el secado solar, los niveles de temperatura y humedad relativa alcanzados fueron, con respecto al aire libre, más altos pero también más uniformes, manteniendo constante la velocidad del aire a lo largo del proceso. Los gradientes de humedad finales obtenidos, que se encuentran dentro del rango para maderas de densidad alta y secado difícil propuestos por Hildebrand (1964) y JUNAC (1989), fueron menos pronunciados que al aire libre, lo que pudo ocasionar que la presencia de grietas y rajaduras se presentara más tenue en este sistema.

El secado convencional es entre los tres sistemas considerados, el más rápido en cuanto a velocidad de secado por lo que también fue posible que las grietas y rajaduras se presentaran con mayor intensidad, aún cuando en este sistema tanto la temperatura como la humedad relativa y velocidad del aire se establecieron con base en el programa de secado utilizado (Especial I), el cual garantiza una buena calidad de secado de la madera, utilizando altas temperaturas para permitir el mayor flujo del agua a través de los capilares de la madera, no obstante que al mantener una HR alta, se redujera la tasa de evaporación de humedad de la superficie.

Las variaciones de humedad relativa fueron más severas en el secado al aire libre en un rango del 25% entre mañanas y tardes con respecto a las horas de mayor insolación. En tanto que para el secado solar las variaciones dentro de la cámara, al disminuir la temperatura, fueron del orden del 10%. En el secado convencional, la HR se mantuvo controlada, reduciéndola conforme fue disminuyendo el contenido de humedad en la

madera, por lo que el porcentaje atribuible a grietas fue el más bajo entre los tres (8.18%), y sin embargo, las diferencias entre éste y el secado solar (9.21%), no son tan marcadas.

El alto porcentaje de defectos de secado obtenidos en la calificación de calidad de la madera de encino se debió al uso de un sistema de clasificación enfocado principalmente para evaluar calidad de secado en madera de pino, género que en general, presenta un comportamiento más noble al secado. Sin embargo, en éste trabajo en particular, la finalidad consistió en poder comparar los niveles de calidad entre los tres sistemas de secado (al aire libre, solar y convencional) de la madera de la misma especie y de conocer con cuál de los tres se obtenía la mejor calidad o en su defecto, determinar si éstos eran iguales independientemente del nivel general en que se ubicaran y no el determinar si la calidad de los encinos resultaba igual a la calidad del pino, lo cual no es factible debido a que pertenecen a grupos taxonómicos diferentes y a las diferencias de características y propiedades de sus maderas. Sin embargo, la clasificación los ubicó dentro de las mismas condiciones de secado y de los ocho niveles de calidad presentados (Cuadro 4) que va de excelente a muy mala, se observó que las diferencias de calidad entre los los sistemas de secado solar y convencional no son tan marcadas, siendo ligeramente inferior en el secado al aire libre.

Con base en los resultados, se observa la factibilidad y conveniencia de secar la madera de encino en los secadores solares, sin un mayor detrimento en la calidad con respecto al que se obtuvo con los otros dos sistemas alternativos experimentados.

6.2. TIEMPOS DE SECADO.

La pérdida de humedad en la madera se ha comprobado experimentalmente, que es más rápida por arriba del punto de saturación de la fibra (PSF) que por debajo de él, ya que el movimiento del agua libre (por arriba del PSF) se realiza principalmente por capilaridad, mientras que el movimiento del agua de imbibición (por debajo del PSF) se realiza por difusión, requiriéndose en éste último de la aplicación de energía térmica (JUNAC, 1989 y Simpson, 1991).

Las Curvas de secado de los tres sistemas que se presentan en la figura 18, muestran claramente los tiempos totales de secado, siendo de 128 días para el secado al aire libre, 38.5 días para el secado solar y de 9.75 días para el secado convencional. Se observa que el tiempo de secado solar es 3.3 veces menor que el del aire libre y 3.9 veces mayor al secado convencional.

La diferencia en el tiempo de secado solar respecto al del aire libre puede obedecer a las condiciones de temperatura y humedad relativa que durante el proceso prevalecieron en el interior del secador solar y que fueron consistentemente más altas, más uniformes y prolongadas durante el día, alcanzándose al final, contenidos de humedad promedios de 11% y 12% en cada repetición, en tanto que al aire libre lo prolongado del tiempo, puede atribuirse a las variaciones del clima y principalmente a la menor temperatura ambiental que

dió como consecuencia una tasa de velocidad de secado baja, alcanzando en el mismo tiempo que el solar, sólo el 22% de contenido de humedad.

Otro factor que afectó el tiempo de secado al aire libre fué la frecuencia en los períodos de lluvia, que consecuentemente ocasionó aumentos en el contenido de humedad en un rango de 0.30-0.35% durante un período de 30 días a partir de un CH del 21% y sólo se registraron disminuciones en el contenido de humedad en la madera al disminuir la humedad relativa pero a un ritmo de secado aún más lento, hasta que finalmente la humedad de la madera se estabilizó con la humedad de equilibrio higroscópico con el ambiente (14% de CH en promedio).

El comportamiento del ritmo de secado de la madera por unidad de tiempo, mostró diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de secado. Estas diferencias se explican porque la temperatura y la velocidad del aire influyen de manera importante en el arrastre de humedad, provocando una mayor evaporación de humedad de la capa superficial de las tablas en el rango de agua libre. El ritmo más alto se presentó en el secado convencional, medio en el secado solar y muy bajo al aire libre, con una proporción porcentual por tratamiento de 100%, 36.86% y 20.34% al perder humedad en el rango de agua libre y de 100%, 15.32% y 4.27% en el rango de agua de imbibición o del 30% de CH hasta la humedad final alcanzada, respectivamente. Esta situación nos indica el efecto significativo de la velocidad del aire en los tres tratamientos y entre rangos de humedad por tratamiento, y sobre todo, el efecto de la mayor temperatura de secado en los dos primeros.

Por abajo del punto de saturación de la fibra (rango de agua de imbibición), el secado convencional redujo su ritmo de secado en un tercio respecto al ritmo presentado durante el rango de agua libre. El secado solar lo redujo a 2/3 partes y el secado al aire libre presentó una reducción de una séptima parte del anterior. Comparativamente, aún en el rango de agua higroscópica, el secado convencional mantuvo un ritmo de secado alto (70%), medio en el secado solar (30%) y muy bajo al aire libre (14.7%). Esto nos muestra que, a pesar de todo, la velocidad de secado en el secador solar comparativamente con el secado al aire libre, fué mayor.

Si se considera que la madera de encino fue de 3/4 de pulgada de espesor, los resultados respecto al tiempo de secado al aire libre, son similares para madera de encino de 1" de espesor, reportados por McMillen y Wengert (1978), Lumley y Choong (1979) quienes estiman un tiempo de secado entre 60 y 120 días y son relativamente menores a los que señalan Peck (1962), Plumtre (1979), Oliveira *et al.* (1982), Chen y Helton (1989) y Alvarez y Fernández-Golfín (1990).

Los tiempos estimados en el secado solar, son equivalentes dadas las condiciones de cada estudio y coinciden con los reportados por Peck (1962), Bois (1977), Plumtre (1979), Tschernitz y Simpson (1979), Little (1984), Chen y Helton (1989) y Alvarez y Fernández - Golfín (1990) y se encontraron un poco superiores respecto a los consignados por Lumley y Choong (1979), Rodríguez *et al.* (1989) y Ochoa (1991) y un tanto inferiores a los que reporta Oliveira *et al.* (1982). Sin embargo, los valores reportados de este experimento,

pueden variar con la época del año, ya que el tiempo de secado al igual que al aire libre, depende fuertemente de la incidencia solar y de las condiciones ambientales prevaletientes en la zona.

El tiempo de secado convencional es un proceso que se mantiene estable en todo momento, ya que las condiciones de secado pueden mantenerse en cualquier época del año y sólo dependen del programa de secado que se aplique en función del tipo de madera a secar. En el secado de madera de encino, los resultados obtenidos por Tschernitz y Simpson (1979) y Rodríguez *et al* (1989), son similares a los que se obtuvieron de este experimento y mayores al tiempo que reporta Ávila (1985). Morales (1980), reporta tiempos de secado para madera de pino también muy aproximados, aunque se trata de maderas que requieren de programas de secado y tiempos diferentes y no proceda la semejanza por tratarse de especies diferentes, se les toma como referencia entre sistemas de secado para hacer la comparación pertinente.

6.3. COSTOS DEL SECADO.

El secado de la madera tiene como función extraer el exceso de agua que contiene en su interior en el menor tiempo posible, con el mínimo de defectos y con costos relativamente bajos. En este trabajo, se analizaron además de los costos de secado, los costos de la madera

seca por unidad de volúmen. También se obtuvo la relación beneficio-costo en cada uno de los sistemas de secado desarrollados.

De los resultados que se presentan en los Cuadros 30 y 31, se observó que la proporción porcentual de los costos totales de secado por pie tabla para los sistemas convencional, solar y al aire libre fueron, de 100.0%, 62.0% y 62.0%, respectivamente. Los costos de secado solar y al aire libre fueron equivalentes. Sin considerar el volúmen por pérdidas de madera seca, la proporción porcentual con respecto al secado convencional representan el 31.43% para el secado solar y el 15.23% para el secado al aire libre. En este mismo tenor los costos de secado al aire libre y convencional representan el 48.5% y 318.2%, respectivamente, respecto al secado solar.

Los costos de la madera seca por m³ tanto al aire libre (\$1716.27 pesos) como solar (\$1710.25 pesos) son aproximadamente iguales, solo que la calidad de la madera seca de éste último es superior a la del secado al aire libre. Comparativamente, los costos por m³ y pie tabla de los sistemas mencionados representan el 80% del secado convencional.

En el secador solar, se obtuvieron los costos más bajos tanto de secado como de madera seca, aún cuando el consumo de energía eléctrica representa el 33.32% de la utilizada en el secador convencional y que se sabe, es de los que más influyen en los costos totales de secado, además de los costos de infraestructura que son menores que en el convencional y un poco mayores que al aire libre.

El mayor costo del secado al aire libre respecto al solar, se puede atribuir al tiempo tan prolongado del proceso que consecuentemente incurre en altos intereses sobre el capital circulante y a la pérdida de calidad de la madera por efecto de fluctuaciones en el clima o de intemperismo.

En el secado solar, aunque la literatura reporta escasos trabajos realizados sobre costos con madera de encino, éstos son relativamente bajos en comparación con el secado convencional, relación que se confirma en este experimento.

Los costos de secado solar obtenidos, coinciden con Plumptre (1979), quien reporta un costo unitario para madera de encino de 2" de espesor de 59.90 libras esterlinas por m³ (\$1.673 pesos por pie tabla)². Por otro lado, Martínez *et al* (1984) reportan la proporción porcentual de los costos de secado por pie tabla para madera de pino en secador convencional, solar y al aire libre de 100%, 60% y 46%, respectivamente.

Los costos por pie tabla del secado al aire libre para *Pinus radiata* de 25 mm de espesor estimados por Morales (1980), representan el 21.83% con respecto al costo de secado convencional (100%). Sin embargo, comparativamente con los costos del secado al aire libre y convencional de encino de éste experimento, son un poco superiores que los estimados por dicho autor para pino, aunque debe tenerse en cuenta que la madera de pino

² Cotización de 1 libra esterlina al 01/Junio/1996 = \$11.84

requiere de tiempos menores para su secado y por lo tanto, el costo por consumo de energéticos también debió ser menor.

Harpole (1988) estimó los costos de la madera seca de encino rojo de 4/4" de espesor para No. 1 común secada en secador convencional en 642.00 \$US Dls por millar de pies-taba que equivale a 0.642 \$US Dls por pie tabla de madera seca, es decir; \$4.94 pesos mexicanos a razón de \$7.70 por dólar. El costo estimado por dicho autor es ligeramente inferior al que se obtuvo en este trabajo.

Little (1984), Martínez et al. (1984), Rodríguez et al. (1989) y Alvarez y Fernández-Golfin (1990) coinciden en que de los tres sistemas de secado, el costo mayor lo representa el secado convencional y el más bajo el secado al aire libre, ya que el secado al aire por abajo de un 18% de CH, tiene un costo excesivo y, el secado solar ante el secado convencional, representa un considerable ahorro en el consumo de combustible y de energía.

En México a nivel industrial, la madera de encino de 4/4" de espesor secada en estufa convencional, actualmente se comercializa en \$26.50 por pie tabla para clase selecta y de \$18.50 para la clase segunda y No. 1 común (precios de junio de 1996). El costo total por pie tabla de la madera seca obtenido en este trabajo, incluido el costo por uso de combustible (costo por contaminación al ambiente) fué de \$5.03 el cuál, dados los precios corrientes del mercado de la madera, se considera que es aceptable.

De la relación beneficio-costo calculada, resultó ser más alta en el secado solar (3.63), media en el secado convencional (3.35) y la más baja en el secado al aire libre (2.63). Como puede observarse (Cuadro 31), la relación beneficio-costo del secado solar es ligeramente mayor a la obtenida en el secado convencional. De los tres sistemas, los secadores solares, presentan un mayor margen de ganancias y no generan contaminantes al medio ambiente por uso de combustibles.

Conforme con los resultados obtenidos y los reportado en la literatura respecto a la calidad, tiempo y costos del secado solar, resulta conveniente y factible el uso de este equipo para el secado de la madera de encino a nivel industrial, especialmente para pequeños productores con bajos recursos económicos o de poca capacidad de inversión, dado que los secadores solares están diseñados para secar reducidos volúmenes de madera aserrada, su costo de construcción es relativamente bajo y el monto de la inversión que se requiere también es relativamente bajo.

7. CONCLUSIONES.

La calidad del secado solar no resultó inferior que la obtenida por el secado al aire libre e inclusive fue ligeramente mejor que la calidad del secado convencional.

Dado que el secado solar depende directamente de radiación solar, los resultados que se reportan, solo pueden ser aplicables al mismo género, zona geográfica y época de año.

La intensidad y magnitud de las grietas fue mayor en el secado al aire libre y menor en el secado solar.

El defecto de apanamiento no se manifestó en ninguno de los tres sistemas evaluados.

El tiempo de secado es significativa y estadísticamente diferente en los tres tratamientos, siendo mayor en el secado al aire libre e intermedio en el solar.

De los tres tratamientos, el costo por pie-tabla de madera secada en secador solar resultó ser el más bajo, intermedio al aire libre y el más alto en el secador convencional.

En el secado solar, aunque requirió cuatro veces más de tiempo del secado convencional, la calidad resultante fue superior y su costo unitario resultó ser el 40% más barato que éste.

En el secado al aire libre, aún cuando se haya obtenido un costo unitario equivalente al del secado solar, también se obtuvo la calidad más baja y requiere para su secado de tiempos mayores.

Se considera más ventajoso el secado solar con respecto a los secados de referencia, ya que no requiere de fuertes gastos de inversión y operación como en el convencional, ni de tiempos muy prolongados que demeritan la calidad de la madera y limitan el movimiento de capital en el proceso de comercialización de la misma como en el secado al aire libre.

8. RECOMENDACIONES.

Fomentar el uso de los secadores solares para operar en pequeñas industrias y secar volúmenes pequeños de madera.

Instalar y usar secadores solares para el secado de madera de encino, como un sistema alternativo del secado al aire libre, ya que reduce el tiempo de secado a 1/4 de éste y la calidad resultante es superior.

Evaluar rangos de gradientes de humedad a lo largo del proceso de secado, en estudios de ésta índole.

La colocación de sobrepesos en cualquiera de los sistemas de secado que se escoja, para reducir el defecto de acanalamiento y colocar separadores a no más de 50 cm de distancia en la construcción de las pilas, ya que se trata de una madera propensa a las deformaciones.

Se recomienda repetir el experimento en invierno, para determinar el comportamiento del secado en los meses fríos.

9. LITERATURA CITADA.

- ÁVILA S., C. G. 1985. Secado en estufa de la madera aserrada de mezclas de encinos rojos y blancos. II Seminario nacional sobre utilización de encinos. Publicación especial No. 49. SARH-Inst. Nac. Invest. For. Agrop. México. pp. 218-228.
- ALVAREZ N., H. and FERNANDEZ-GOFIN, S. 1990. Solar drying of sawn lumber in Spain. Holz als Roh-und Werkstoff. 48:173-178.
- BACHRICH, 1980. Dry kiln handbook. by Simpson. North Vancouver, B.C. 370 p.
- BEJAR M., G. 1985. Algunas recomendaciones prácticas para la utilización de madera de encinos. II Seminario nacional sobre utilización de encinos. Publicación especial No. 49. SARH-Inst. Nac. Invest. For. Agrop. México. pp. 380-384.
- BORJA DE LA R., M. A. M 1991. Estimation des proprietes du bois de trois especes de chene du mexique (*Quercus candicans*, *Quercus crassipes* et *Quercus laurina*) en vue de developper leur utilisation industrielle. Thèse doctorat en science du bois. Univerite de Nancy I. France. 334 p.
- BOIS, P. J. 1977. Constructing and operating a small solar-heated lumber dryer. Forest Products Utilization. Tech. report No. 7. Madison, U.S.A. 12 p.
- BRAVO A., A. A. 1977. Comportamiento de Pino insigne (*Pinus radiata* D. Don) bajo dos condiciones de secado por vapor recalentado. Tesis profesional. Univ. Austral de Chile. Valdivia, Chile.

- CORVALAN P., R. 1985. Secado de madera mediante el aprovechamiento de energía solar. Tesis doctoral. Esc. Tec. Sup. de Ingenieros Industriales. Univ. Politécnica de Madrid. Madrid. 225 p.
- CHEN, P. Y. S. 1981. Design and test of a 500 BF solar kiln. Forest Prod. J. 31(3):33-38.
- and CH. E. HELTON. 1989. Design and evaluation of a low-cost solar kiln. Forest Prod. J. 39(1):19-22.
- CHILE. INSTITUTO FORESTAL 1987. Secado por deshumidificación de especies de madera de interés comercial. Informe Técnico No. 100. Parte I:Pino insigne, Coigue, Tapa y Lenga. CORFO-Fac. de Ingeniería Ftal. Univ. Austral de Chile. Santiago, Chile. 111 p.
- CHILE. INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Norma Chilena Oficial. Nch. 178. Of. 79. Madera aserrada de pino insigne. Clasificación por aspecto.
- CHUDNOFF, M., E. D. MALDONADO and E. GOYTIA.1966. Solar drying of tropical hardwoods. U.S. Dept. Agri. Forest Serv., Res. Pap. ITF-1. Inst. Trop. For., Rio Piedras, Pto. Rico. 26 p.
- DENIG, J. and E. M., WENGERT. 1982. Estimating air drying moisture content losses for red oak and yellow poplar lumber. Forest Prod. J. 32(2): 26-31.
- DÍAZ G., V. 1977. Secado de maderas en estufa. "Ponencia en Seminario sobre industrialización forestal". México, D.F. 7pp.
- FUENTES L., M. E. 1990. Propiedades físico-mecánicas de cinco especies de encino (*Quercus* spp) del estado de Puebla. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. México. 57 p.

- FUENTES S., M. 1994. Secado de la madera aserrada de *Pinus radiata* D.Don, impregnada con sales hidrosolubles CCA. Tesis de maestría. Univ. Austral de Chile. Valdivia, Chile. 162 p.
- GABY, L.I. 1963. Surface Checking of White Oak as related to Mechanical Processing. *Forest Prod. J.* 13(12):529-532.
- GARCÍA, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koeppen. Instituto de Geografía . U.N.A.M. 2a. Ed.. 246 pp.
- HARPOLE, G. B. 1988. Investment opportunity: The FPL low-cost solar dry kiln. *Gen. Tech. Rep. Forest Prod. Lab. No. 58*, 5 p.
- HILDEBRAND, R. 1964. El secado de la madera aserrada. Talleres Iberoamericanos. Sabadel, España. 159 p.
- JUNAC. 1989. Manual del grupo andino para el secado de maderas. Junta del Acuerdo de Cartagena Lima. 418 p.
- KAUMAN, W. y MITTAK, G. 1966. Ensayos de secado en Coigüe (*Nothofagus dombeyi*). *Inf. Tec. No. 25*. Instituto Forestal. Santiago, Chile. 25 p.
- KUNZE G. Y J. J. HERMOSILLO. 1985. Horno solar para secar madera en la Sierra Huichola. *Cuaderno de Div. Acad. No. 10. Inst. Tec. de Est. Sup. de Occ.* pp. 178-180.
- LITTLE, R. L. 1984. Industrial Use of solar heat in lumber drying: along-term performance report. *Forest Prod. J.* 134(9):22-26.
- LUMLEY, T. G. and E. T. CHOONG. 1979. Technical and economic characteristics of two solar kiln designs. *Forest Prod. J.* 29(7):49-56.

- MALDONADO, E.D. and E.C., PECK. 1962. Drying by solar radiation in Puerto Rico. *Forest Prod. J.* 12(10):487-488 pp.
- MARTINEZ E., PINILLOS Y CUETO. 1984. Secadora solar para maderas. Inst. Nac. de Invest. Rec. Biot. Nota Técnica No. 10. INIREB-LACITEMA. Xalapa, Ver., México. 14 p.
- MARTINEZ, M. 1981. Los encinos de México. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Serie Técnica de Manejo. 2ed. No.8. Morelia. 358 p.
- Mc MILLEN J. M. 1963. Stresses in wood during drying. Rep. No.1652. FPL-Forest Serv. Univ. of Wisconsin, U.S.A. 33 p.
- and E. M. WENGERT. 1978. Drying eastern hardwood lumber: Agriculture Handbook No.528. FPL-Forest Serv.-Univ. of Wisconsin, U.S.A. 104 p.
- MORALES V., E. 1980. Proyecto de factibilidad de instalación de un secador de madera en el aserradero Vista Alegre (A.V.A). Documento de trabajo interno. Fac. de Ingeniería Ftal. Univ. Austral de Chile. Valdivia, Chile. 44 p.
- OCHOA A, A. 1991. La energía solar en el secado de madera: Michoacán Forestal. Secc. Mich. No. 1. Asoc. Mex. de Prof. Ftales. A. C. pp. 15-17.
- OLIVEIRA, L. C., C. SKAAR, and E. M. WENGERT. 1982. Solar and air lumber drying during winter in Virginia. *Forest Prod. J.* 32(1):37-44.
- PECK E. C. 1962. Drying 4/4" red oak by solar heat. *Forest Prod. J.* 12:103-107.
- PLUMPTRE, R. A. 1979. Simple solar heated timber dryers: design, performance and commercial viability. *Commonw. For. Rev.*, 58(4): 243-251.

- RASMUSSEN, E. F. 1961. Dry kiln. Operator's manual. FPL-FS. U.S. Department of Agriculture. No. 188. Washington, D. C. 197 p.
- ROBERTSON S. J. and P. O. Mc CORMIC. 1978. Solar industrial process heat for kiln drying lumber: Proceedings, practical application of solar energy to wood processing, Blacksburg, Va., Jan 6-7. pp. 65-68.
- RODRIGUEZ A. R., F. J. FUENTES y E. MONTES R. 1989. El uso de secadores solares en la industria de la madera. AMATL. Instuto de Madera Celulosa y Papel. Bol. Difusión No. 9. pp. 22-33.
- RZEDOWSKI, J. 1978. Vegetación de México. Ed. Limusa, Mexico, D.F. 432 p.
- SCHNIEWIND, A. P. 1960. On the nature of drying stresses in wood. *Holzforschung*. 14(6):161-168.
- SIMPSON, W.T. 1991. Dry kiln operator's manual. USDA. Forest Service, FPL. Madison. 274 p.
- and J. L. TSCHERNITZ 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. *Forest Prod. J.* 34(5):25-34.
- STEINMAN, D. E. and H. F. VERMAAS. 1990. Control of equilibrium moisture content in a solar kiln. *Holz als Roh-und Werkstoff* 48: 147-152.
- TROXELL. H. E. and L. A. MUELLER. 1968. Solar lumber drying en the Central Rocky Mountain region. *Forest Prod. J.* 18(1):19-24.
- TSCHERNITZ J. L. and W. T. SIMPSON. 1979. Solar-heated, forced air, lumber dryer for tropical latitudes. Technical Note. *Solar Energy*. 22:563-566. Madison, Wi. U.S.A.
- WENGERT E. M. 1971. Improvements in solar dry kiln designs, U.S. Forest Service, Research Note FPL-0212.

YANG K. C. 1980. Solar kiln performance at a high latitude, 48° N. Forest. Prod. J.
30(3):37-40.

ZAMUDIO S., F.J. y M., FUENTES S. s/f. Construcción de Curvas Equivalentes de secado.
Serie Avances de Investigación No. 3. DICIFO. Chapingo, México. 10 p.

10. ANEXOS.

ANEXO I. Condiciones de temperatura y tiempos de secado reales del secado convencional. Programa Especial I.

ETAPA	FECH-HORA INICIO	TERMINO	T(hs)	TBS °F	DE P	TBH °F	HR %	CHE %
Edo inicial de la estufa	19-IX-95 12:00 a 14:40							
Elevacion de T°	19-IX-95 14:40 a 16:30		02.17	090	00	090	100	
Inic calentam.	19-IX-95 16:30 a 19:30		03.00	110	00	110	100	
Inicio Etapa X-40%	19-IX-95 19:30	23-IX-95 22:30	99.00	110	05	105	84	
Etapa 40-35%	23-IX-95 22:30	25-IX-95 09:00	33.00	110	10	100	70	12.0
Etapa 35-30%	25-IX-95 09:00	26-IX-95 09:00	24.00	115	12	103	66	10.9
Etapa 30-25%	26-IX-95 09:00	26-IX-95 22:00	13.00	125	16	109	59	9.4
Etapa 25-20%	26-IX-95 22:00	27-IX-95 21:30	23.30	140	22	118	51	7.6
Etapa 20-15%	27-IX-95 21:30	29-IX-95 09:30	33.5	150	29	121	48	6.0
Igualamiento	29-IX-95 09:30	04-X-95 04:00	114.5	150	14	136	68	10.0
Acondicionam	04-X-95 04:00	04-X-95 18:30	14.5	150	09	141	76	12.0

ANEXO II. PROGRAMA DE SAS PARA LA OBTENCION DE LA CURVA GUIA Y CURVA EQUIVALENTE DE SECADO SOLAR DESDE 63% DE CH INICIAL AL 12% DE CH FINAL.

```
data A1;
Infile 'b:\s1.dat'; /*archivo con mayor humedad inicial*/;
Input t1 ch1;
  HI1=71.08;
  LT1=log(t1);
  ch1=ch1/HI1;
Proc Nlin Method=Marquardt;
  Parms b=0.032641246 c=0.4154204228; /* PARAMETROS CURVA GUIA*/;
Model ch1=Exp(-b*t1**c);
der.b=-(T1**c*ch1);
der.c=-(b*T1**c*LT1*ch1);
Output out=b1 p=CH1e parms=bel cel;
Proc datasets; delete A1;
Data A2;
Infile 'b:\s2.dat'; /*archivo con humedad inicial menor*/;
Input t2 ch2;
  HI2=60.55; /*ARCHIVO CON HUMEDAD INICIAL MENOR*/;
Data A12; merge b1 A2;
  ch21=HI1*exp(-bel*t2**cel);
  dch=ch21-ch2;
Proc datasets; delete b1 A2;
Proc Nlin Method=marquardt;
k=HI1-HI2;
k1=k**(1-w*t2)*exp(-a*t2);
Parms w=0.0000002 a=0.0017; /* PARAMETROS CURVA COMPENSADORA*/;
Bounds 0<w<0.021, 0<a<0.2;
Model DCH=k1;
  Der.w= -t2*log(k)*k1;
  Der.a= -t2*k1;
Output Out=B12 P=dCHe parms=we ae;
Proc datasets; delete A12;
Data C12; Set B12;
  ch1=ch1*HI1;
  ch1e=ch1e*HI1;
  ch2e=ch21-dCHe;
Proc datasets; delete B12;
Proc Print; var t1 ch1 ch1e t2 ch2 ch2e;
Data D12; set C12;
  Do T=0 to 930 by 12 while (_N_=1);
  H1P=HI1*EXP(-bel*T**cel);
DCH63=8.08**(1-WE*T)*EXP(-AE*T); H63P=H1P-DCH63;
Output;
End;
Data E12; set D12;
Keep T H1P H63P;
Proc datasets; Delete D12;
Proc Print Data=E12; VAR T H1P H63P;
Proc plot;
  Plot H1P*T=P H63P*T=*;
RUN;
```

ANEXO III. PROGRAMA DE SAS PARA LA OBTENCION DE LA CURVA PROMEDIO Y CURVA EQUIVALENTE DE SECADO AL AIRE Y CONVENCIONAL DESDE 63% DE CH INICIAL AL 12% DE CH FINAL.

```
Data A1;
Infile 'b:\L3.dat'; /*archivo con mayor humedad inicial*/;
Input t ch;
  HI=63;
  LT=log(t);
  ch1=ch/HI;
Proc Nlin Method=Marquardt;
  Parns b=0.0389727179 c=0.450001262; /* PARAMETROS CURVA GUIA*/;
Model ch1=Exp(-b*t**c);
der.b=(t**c*ch1);
der.c=(b*t**c*LT*ch1);
Output out=b1 p=CH1e parms=bel cel;
Proc datasets; delete A1;
Proc Print Data=b1; VAR T ch ch1e bel cel;
Proc plot;
  Plot ch1e*T='*';
Data a2; set b1;
DO t=0 TO 3100 BY 24 WHILE (_N_=1);
H1P=HI*EXP(-BEL*T**CEL);
OUTPUT; END;
DATA A3;SET A2;
Keep T H1P;
Proc Datasets; Delete A2;
Proc Print Data=A3; var T H1P;
Proc Plot; Plot H1P*T='*';
RUN;
```

ANEXO IV. VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO AL AIRE LIBRE.

REPET 1		REPET 2		VALOR ESTIMADO	
T1	CH1	T2	CH2	TE	CHE
0	64.50	0	61.50	0	63.0000
		124	48.97	120	44.84
		165	44.47	168	42.24
218	43.92	217	42.29	216	40.0846
259	40.96			240	39.1363
311	39.37	312	35.86	312	36.6634
		389	35.29	384	34.60
406	34.60			408	33.9801
		461	33.21	456	32.8258
483	33.96			480	32.2860
		533	30.04	528	31.2710
		605	26.66	600	29.8875
627	28.92			624	29.4584
		677	25.85	672	28.6423
699	25.72			696	28.2536
		725	24.75	720	27.8769
771	25.11	773	23.03	768	27.1565
819	24.34	816	22.64	816	26.4765
867	22.74	868	21.14	864	25.8330
910	22.45			912	25.2224
962	21.07			960	24.6419
		988	20.92	984	24.3621
1082	21.17	1036	21.36	1032	23.8219
1082	21.17			1080	23.3060
1130	21.98			1128	22.8125
				1152	22.5736
1250	21.16	1155	20.53	1248	21.6661
		1348	20.42	1344	20.8281
1442	20.88			1440	20.0507
		1485	19.77	1488	19.6826
1579	20.50			1584	18.9834
		1632	19.70	1632	18.6510
1727	20.58			1728	18.0175
		1804	17.12	1800	17.5678
		1851	17.19	1848	17.2792
1898	18.15			1896	16.9990
1945	18.27			1944	16.7269
		1994	16.35	1992	16.4625
		2045	16.37	2040	16.2054
2088	17.55			2088	15.9553
		2114	17.10	2112	15.8328
2139	17.59			2136	15.7119
2208	18.16	2206	16.92	2208	15.3588
		2275	15.08	2280	15.0193
2300	18.17			2304	14.9090
2368	16.19	2361	14.52	2352	14.6925
2455	15.60			2448	14.2753
		2641	13.04	2640	13.4989
2735	14.11			2736	13.1369
				2760	13.0489
				2832	12.7908

2952	12.3789
3000	12.2202
3048	12.0648
3072	11.9883
3096	11.9126

ANEXO V. VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO AL SOLAR.

REPET 1		REPET 2		VALOR ESTIMADO	
T1	CH1	CH2	TE	CHE	H63 (CURVA EQUIV. DE SECADO)
0	71.08	60.55	0	71.08	63.00
			24	62.4087	55.2652
46	60.36	53.08	48	57.4018	51.0864
			72	53.4135	47.8301
			96	50.0334	45.0972
			120	47.0801	42.7160
141	43.32	40.46	144	44.4512	40.5930
			168	42.0812	38.6702
			192	39.9248	36.9092
218	39.45	37.27	216	37.9486	35.2826
			240	36.1273	33.7702
			264	34.4408	32.3570
			288	32.8731	31.0308
290	34.35	32.90	300	32.1296	30.3974
			312	31.4111	29.7823
			336	30.0435	28.6036
362	27.92	26.32	360	28.7613	27.4882
			384	27.5563	26.4308
			408	26.4217	25.4266
434	22.78	21.06	432	25.3514	24.4717
			456	24.3403	23.5625
			480	23.3836	22.6960
506	21.15	19.54	504	22.4772	21.8693
			528	21.6174	21.0800
554	19.55	18.14	552	20.8009	20.3258
			576	20.0247	19.6047
602	17.36	15.95	600	19.2861	18.9147
			624	18.5826	18.2543
645	16.30	15.13	648	17.9120	17.6218
			672	17.2723	17.0157
697	14.48	13.30	696	16.6615	16.4346
			720	16.0779	15.8774
			744	15.5200	15.3427
			768	14.9863	14.8295
			792	14.4754	14.3368
817	13.36	12.48	816	13.9861	13.8636
834	13.45	12.57	840	13.5172	13.4088
865	13.36	12.36	864	13.0676	12.9718
			888	12.6363	12.5516
			912	12.2224	12.1475
			924	12.0217	11.9513
958	13.00	12.07			
1008	12.60	11.74			
1175	12.43	11.75			

ANEXO VI. VALORES DE CH OBSERVADOS Y ESTIMADOS EN EL SECADO CONVENCIONAL.

REPET 1		REPET 2		VALOR ESTIMADO
T	CH1	CH2	TE	CHE
0.0	65.60	60.61	0	63.0000
			12	60.7487
19.5	56.46	54.07	20	58.7257
			24	57.6438
			36	54.2367
46.5	48.61	48.11	46	51.3036
			48	50.7134
			60	47.1796
			72	43.7036
75.0	41.42	42.09	76	42.5661
			84	40.3310
85.0	38.97	39.93	86	39.7813
			96	37.0930
99.0	36.25	37.63	100	36.0474
			108	34.0103
			120	31.0958
122.0	32.26	33.74	122	30.6270
133.5	30.15	31.98	134	27.9175
			144	25.7956
			156	23.4119
			168	21.2024
157.5	24.52	25.78	158	23.0317
			168	21.2024
170.5	21.77	22.73	170	20.8508
			180	19.1619
			192	17.2838
			204	15.5606
206.5	13.27	13.52	206	15.2879
207.0	13.13	13.42	208	15.0192
			216	13.9841
219.5	11.04	11.09	220	13.4897
			228	12.5456
230.5	9.66	9.54	230	12.3187
			232	12.0953
			234	11.8755

ANEXO VII. Costos estimados de secado y de madera seca de encino en los tres sistemas dsarrollados.					
FACTORES UTILIZADOS PARA EVALUAR COSTOS	SIMBO	AL AIRE	SOLAR	CONVENCIO	GASÓLEO
INVERSION INICIAL (\$)	I	67734.97	276381.75	1205925.00	
VIDA UTIL DEL EQUIPO (años)		5.00	10.00	30.00	
PORCENTAJE ANUAL DE DEPRECIACION (%)	F1	20.00	10.00	3.33	
VOLUMEN DE MADERA A SECAR/AÑO (m3)	Vm	793.63	793.63	793.63	
NUMERO DE PILAS O SECADORES/Vol/año		118.01	14.20	1.00	
NUMERO DE CARGAS A SECAR/año		2.85	9.48	13.46	
TASA REAL ACTUAL DE INTERES ANUAL (%)	i	8.00	8.00	8.00	
AREA DEL SECADOR (m2)	As	6300.00	1790.00	1100.00	
COSTO DEL TERRENO (\$/m2)	K1	1.10	1.10	2.53	
EXTRACCION DE HUMEDAD POR m3 DE MADERA (Kg agua/m3)					
$W=((CHi-CHf)/100) \times \text{DENSIDAD BÁSICA: } Po/Vv$	W			346.78	
CONSUMO PROMEDIO DE COMBUSTBLE/año	Q			24260.75	
CONSUMO COMBUSTIBLE/AÑO/Kg agua extraida	Q1			0.09	
EXTRAC.HUMEDAD/VOL MADERA/AÑO/Kg agua extraida	Eh			275211.04	
PRECIO ACTUAL DE COMBUSTIBLE/Galón	Pq			7.14	3.76
POTENCIA DE LOS VENTILADORES EN EL SECADO (Kw)	Nw		1.07	13.41	
CONSUMO ENERGIA VENTILADORES EXPRESADO COMO:					
UN PORCENTAJE DE LA POTENCIA DE MOTORES (%)	Y		100.00	83.33	
COSTO DE LA ENERGIA EN KWh	Pe		0.70	0.70	
PRECIO DE MADERA CON EL FLETE (\$/m3aserrado)	Pm	996.57	996.57	996.57	
TIEMPO DE SECADO (días)	Ts	128.00	38.50	26.00	
CAPACIDAD DEL SECADOR (m3)	Vs	2.36	5.90	58.96	
TIEMPO DE APILADO/m3 (minutos)	Ta	40.00	40.00	20.00	
TIEMPO DE DESAPILADO/m3 (minutos)	Td	30.00	30.00	15.00	
NUMERO DE PEONES		2.00	2.00	6.00	
SALARIO,INCLUIDAS LAS PRESTACIONES (\$/h)	L	9.89	9.89	9.89	
PERDIDAS DE MADERA EN EL SECADO (%)	Pw	43.00	35.00	35.00	
DEPRECIACION SOBRE INVERSIONES/m3					
$(I \cdot F1)/(Vm \cdot 100)$	DI	17.07	34.83	50.60	
INTERES SOBRE LA INVERSION/m3					
$(I \cdot i)/(Vm \cdot 100)$	II	6.83	27.86	121.56	
INTERES SOBRE EL COSTO DEL TERRENO/m3					
$(As \cdot K1 \cdot i)/(Vm \cdot 100)$	It	0.70	0.20	0.28	

Continuación Anexo VII.					
INTERES SOBRE EL CAPITAL CIRCULANTE/m3					
$(Pm*Ts*i)/(12*100)$	Ic	28.35	8.53	5.76	
COSTO DEL DIESEL O ENERGIA/m3					
$W*Q1*Pq$	Cq			218.27	114.88
COSTO DEL CONSUMO DE ENERGIA/m3					
$(Nw*24*Ts*Y*Pe)/(Vs*100)$	Ce		58.85	41.40	
COSTO DE MANO DE OBRA EN EL APILADO/m3					
$(Ta*L)/60$	Ca	6.59	6.59	3.30	
COSTO DE MANO DE OBRA EN EL DESAPILADO/m3					
$(Td*L)/60$	Cd	4.95	4.95	2.47	
VALOR POR PERDIDAS DE MADERA/m3					
$(Pm*Pw)/100$	Vp	428.53	348.80	348.80	
COSTO SECADO/m3 $(DI+II+It+Ic+Cq+Ce+Ca+Cd+Vp)$	T1	493.01	490.60	792.44	689.05
COSTO SECADO/pt $(T1/424)$		1.16	1.16	1.87	1.625111
COSTO SECADO S/PERDIDAS DE MADERA/m3 $(T1-Vp)$	T2	64.48	141.80	443.64	340.2477
COSTO SECADP S/PERDIDAS DE MADERA/pt $(T2/424)$		0.15	0.33	1.05	0.80
COSTOS DE LA MADERA SECA.					
COSTO POR USO DE COMBUSTIBLE/m3 $(Cq*0,30)$	Cc	0.00	0.00	65.48	51.70
COSTO DE LA MADERA SECADA/m3 $(T1+Cc+Pm)$	T3	1489.58	1487.17	1854.49	1840.70
COSTO DE ADMINISTRACIÓN/m3 $(T3*0,15)$	Ca	223.44	223.08	278.17	276.11
COSTO TOTAL DE MADERA SECA/m3 $T1+Pm+Ca+Cc)$	Cms1	1713.01	1710.25	2132.66	2116.81
COSTO TOTAL DE MADERA SECA/pt $Cms/424$	Cms2	4.04	4.03	5.03	4.99
Precios de la madera seca por pie-tabla					
Clase selecta	p1	18.00	21.00	26.50	
Clase No.1 y común	p2	15.00	17.00	18.50	
Clase tercera	p3	7.00	10.00	12.00	
Porcentajes de calidad de secado obtenidos					
Clase selecta	q1	15	20	20	
Clase No.1 y común	q2	25	35	30	
Clase tercera	q3	60	45	50	
Precio promedio (pt) madera seca del expto.		10.65	14.65	16.85	
Precio promedio (m3) madera seca del expto.		4515.6	6211.6	7144.4	
RELACIÓN BENEFICIO/COSTO (B/C)		2.6360573	3.63198747	3.349988981	3.375078