

**Universidad de la República  
Facultad de Agronomía**

**SECADO SOLAR DE TABLAS DE EUCALIPTOS Y PINOS**

por

**Alvaro PEREZ FAVARO  
Cintya SAUER LEITE**

**TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo  
(Orientación Forestal)**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
1999**



## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Agr. Carlos Mantero por la dirección y colaboración en esta investigación.

Asimismo hacemos extensivo nuestro agradecimiento a todos los integrantes del Área Forestal que de una u otra manera colaboraron con el presente trabajo.

Al Ing. Agr. Juan Burgueño por su gran aporte en la elaboración e interpretación del análisis estadístico.

A la cátedra de Agrometeorología por su permanente disposición en la entrega de datos necesarios para la realización del presente trabajo.

También se agradece al personal de Biblioteca por su permanente disposición y apoyo; al Señor José Hernández por el aporte de la madera y el xilohigrómetro utilizados en el ensayo 2.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	IV
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DEL SECADO SOLAR.....	9
2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO SOLAR.....	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	12
3.1. ENSAYO DE <i>Eucalyptus grandis</i> .....	16
3.1.1. <u>Conducción del secado de tablas de <i>Eucalyptus grandis</i></u> .....	16
3.1.1.1 Control de humedad de la carga .....	16
3.1.1.2. Variables registradas.....	17
3.1.1.3. Evaluación del ensayo .....	17
3.2. ENSAYO DE <i>Eucalyptus tereticornis</i> .....	19
3.2.1. <u>Conducción del secado de tablas de <i>Eucalyptus tereticornis</i></u> .....	19
3.2.1.1 Control de humedad de la carga .....	19
3.2.1.2. Variables registradas.....	20
3.2.1.3. Evaluación del ensayo .....	20
3.3. ENSAYO DE <i>Pinus elliotti</i> .....	22

---

3.3.1. <u>Conducción del secado de tablas de <i>Pinus elliotti</i></u> .....	22
3.3.1.1 Control de humedad de la carga .....	24
3.3.1.2. Variables registradas.....	28
3.3.1.3. Evaluación del ensayo .....	28
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	29
4.1. ENSAYO DE <i>Eucalyptus grandis</i> .....	29
4.1.1. <u>Evolución de la temperatura</u> .....	29
4.1.2. <u>Evolución de la humedad relativa</u> .....	31
4.1.3. <u>Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado</u> .....	32
4.1.4. <u>Evolución diaria de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero</u> .....	33
4.1.5. <u>Análisis de las fuentes de variación</u> .....	36
4.1.6. <u>Comparación de las curvas de secado</u> .....	41
4.2. ENSAYO DE <i>Eucalyptus tereticornis</i> .....	42
4.2.1. <u>Evolución de la temperatura</u> .....	42
4.2.2. <u>Evolución de la humedad relativa</u> .....	43
4.2.3. <u>Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado</u> .....	44
4.2.4. <u>Evolución diaria de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero</u> .....	45
4.2.5. <u>Análisis de las fuentes de variación</u> .....	47
4.2.6. <u>Análisis de la curva de secado</u> .....	51
4.3. ENSAYO DE <i>Pinus elliotti</i> .....	52
4.3.1. <u>Evolución de la temperatura</u> .....	52
4.3.2. <u>Evolución de la humedad relativa</u> .....	53

4.3.3. <u>Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado.</u> .....	55
4.3.4. <u>Evolución diaria de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero.</u> .....	56
4.3.5. <u>Análisis de las fuentes de variación.</u> .....	59
4.3.5.1. Efecto de la fecha y sus interacciones. ....	59
4.3.5.2. Efecto del viento. ....	60
4.3.5.3. Probetas de humedad. ....	62
4.3.5.4. Probetas de tensión. ....	63
4.3.6. <u>Comparación de las curvas de secado.</u> .....	65
5 <u>CONCLUSIONES</u> .....	67
6. <u>RESUMEN</u> .....	69
7. <u>SUMMARY</u> .....	70
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	71
9. <u>ANEXO</u> .....	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Diagrama de los colectores solares tipo caja y tipo plato .....	8
2. Test de Fuller para probetas de tensión .....	27

## ÍNDICE DE FOTOS

<b>Foto</b>	<b>Página</b>
1. Vista del secadero solar semi-invernadero utilizado .....	12
2. Vista de los ventiladores del secadero solar utilizado .....	13
3. Vista de las ventilas del secadero solar utilizado.....	14
4. Vista de la estiba de <i>Pinus elliotti</i> dentro del secadero.....	23
5. Vista de la estiba de <i>Pinus elliotti</i> a la intemperie.....	24
6. Pesada semanal de muestras de <i>Pinus elliotti</i> .....	25
7. Probetas de humedad ( <i>P. elliotti</i> ).....	26
8. Probetas de tensión ( <i>P. elliotti</i> ).....	26

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

<b>Gráfica</b>	<b>Página</b>
1. Evolución de temperatura media diaria en secadero e intemperie ( <i>E. grandis</i> ) .....	29
2. Evolución de la humedad relativa media diaria en el secadero e intemperie ( <i>E. grandis</i> ).....	31
3. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado ( <i>E. grandis</i> ).....	33
4. Evolución diaria del contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 3 de secado ( <i>E. grandis</i> ).....	34
5. Evolución diaria del contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 72 de secado ( <i>E. grandis</i> ).....	35
6. Contenido de humedad final (CH%) de 10 filas para los dos sitios de secado ( <i>E. grandis</i> ).....	37
7. Evolución del contenido de humedad (CH) para los distintos tipos de secado y orientaciones ( <i>E. grandis</i> ) .....	38
8. Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas en el secadero y a la intemperie con un intervalo de confianza a 95% ( <i>E. grandis</i> ) .....	39
9. Velocidad del viento en las distintas posiciones en altura y lateralmente en la pila ( <i>E. grandis</i> ).....	40
10. Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas en el secadero y a la intemperie ( <i>E. grandis</i> ).....	41

11. Evolución de la temperatura media diaria en el secadero y a la intemperie ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	42
12. Evolución de la humedad relativa media diaria en el secadero y a la intemperie ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	43
13. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado ( <i>E. tereticornis</i> ).....	44
14. Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 3 de secado ( <i>E. tereticornis</i> ).....	45
15. Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 57 de secado ( <i>E. tereticornis</i> ).....	46
16. Velocidad del viento en las diferentes posiciones de la pila ( <i>E. tereticornis</i> ).....	49
17. Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas en el secadero con un intervalo de confianza a 95% ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	50
18. Temperatura, contenido de humedad de tablas y humedad relativa media semanal durante el período de secado ( <i>E. tereticornis</i> ).....	51
19. Evolución de la temperatura media diaria en el secadero e intemperie ( <i>P. elliotti</i> ).....	52
20. Evolución de la humedad relativa media diaria en el secadero e intemperie ( <i>P. elliotti</i> ).....	53
21. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado ( <i>P. elliotti</i> ).....	55

22. Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 3 de secado ( <i>P. elliotti</i> ).....	56
23. Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero, en el día 62 de secado ( <i>P. elliotti</i> ).....	57
24. Diferencia de la velocidad del viento respecto de la media, entre las distintas posiciones en altura, en la pila dentro del secadero ( <i>P. elliotti</i> ).....	61
25. Evolución del contenido de humedad de las tablas en el secadero y a la intemperie ( <i>P. elliotti</i> ).....	65

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
1. Comparación de costos de diferentes tipos de secado .....	2
2. Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad durante el proceso de secado ( <i>E. grandis</i> ) .....	36
3. Significancia de las diferencias de contenidos de humedad dentro y entre tablas ( <i>E. grandis</i> ) .....	39
4. Significancia de las diferencias en la velocidad del viento dentro del secadero ( <i>E. grandis</i> ) .....	40
5. Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad durante el proceso de secado ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	47
6. Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en el variación del contenido de humedad final de las tablas ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	48
7. Significancia de las diferencias en la velocidad del viento dentro del secadero ( <i>E. tereticornis</i> ) .....	48
8. Efecto del factor fecha en cada tipo de secado ( <i>P. elliotti</i> ).....	59
9. Significancia de la diferencia en el contenido de humedad de las tablas, entre el secadero y a la intemperie, para las distintas fechas ( <i>P. elliotti</i> ).....	59
10. Significancia de la diferencia del contenido de humedad de las tablas, para las diferentes posiciones (norte – sur) en diferentes fechas ( <i>P. elliotti</i> )....	60

11. Significancia de las diferencias en la velocidad del viento en la pila dentro del secadero ( <i>P. ellioti</i> ).....	61
12. Nivel de significancia de los diferentes factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad final (%) de las tablas ( <i>P. ellioti</i> ).....	62
13. Contenido de humedad (%) de la zona interna y externa de las probetas para los diferentes tipos de secado ( <i>P. ellioti</i> ).....	62
14. Resultados del análisis estadístico de la variación en la tensión de las tablas según el tipo de secado ( <i>P. ellioti</i> ).....	63
15. Significancia de la variación en la tensión de secado de las tablas en el secadero y a la intemperie respecto de cero ( <i>P. ellioti</i> ).....	64

## 1. INTRODUCCIÓN.

El siguiente trabajo es parte de un estudio que realiza el Área Forestal de la Facultad de Agronomía para adquirir conocimientos sobre el secado solar y la posibilidad de su aplicación a escala industrial en nuestro país.

Este método de secado podría llegar a tener gran importancia, fundamentalmente entre las pequeñas y medianas empresas de nuestro país, debido a que es un método que implica un costo relativamente bajo de instalación y mantenimiento, fácil operatividad, no es contaminante y el nivel de humedad logrado con los secaderos solares no es posible alcanzarlo mediante el secado al aire, al menos en tiempos tan cortos.

El uso de secaderos solares es una de las opciones que tienen las pequeñas y medianas empresas relacionadas al sector forestal para aumentar el valor agregado de sus productos.

El presente trabajo tiene como objetivos específicos:

- ⇒ Evaluar el secado solar y a la intemperie para distintos usos finales o procesos intermedios en maderas escuadradas de *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus tereticornis* y *Pinus elliotti*.
- ⇒ Comparación de calidades de secado logradas por los dos métodos utilizados.
- ⇒ Ajuste de técnicas y modelos que maximicen la eficiencia del secado solar para las condiciones locales.

Como se mencionó anteriormente, se evaluarán tres ensayos de secado solar. Las especies utilizadas en cada uno de los ensayos fueron: *Eucalyptus grandis* (ensayo 1), *Eucalyptus tereticornis* (ensayo 2) y *Pinus elliotti* (ensayo 3). Tanto en el ensayo 1 como en el 3 se realizó una comparación con el secado a la intemperie de estibas similares.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

El desarrollo de uso de secaderos solares para madera se inicio simultáneamente en India (Rehman y Chawala, 1961, citado por Sattar, 1993) y en Estados Unidos (Johnson, 1961, citado por Sattar, 1993) en la década del 60. Desde entonces ha habido numerosos avances en la tecnología y se han realizado diferentes ensayos con este tipo de secaderos (Jovanovski et al, 1995).

A continuación se citarán algunos de los ensayos más relevantes realizados en los últimos años.

Con la finalidad de transferir a las PYMES (pequeñas y medianas empresas) la incorporación de la tecnología de secado por energía solar, ingenieros en tecnología de la madera (ITM) de la Facultad de Ciencias Forestales – Universidad Nacional de Santiago del Estero (28° Lat. Sur), realizaron un trabajo de diseño, cálculo y construcción de una cámara de secado para maderas aserradas basada en este tipo de energía (Taboada et al, 1996).

Los resultados obtenidos demostraron luego de realizar una comparación entre la eficacia del secado con energía solar en relación al secado al aire libre, que debajo del punto de saturación de las fibras, el secado solar es 2,5 veces más rápido que el efectuado naturalmente. Por otra parte, la humedad final que se logra con el secado al aire libre puede llegar, como máximo, a alrededor del 15%, en tanto que en el secado con energía solar se alcanza el 7% de humedad. Teniendo en cuenta el consumo de energía del ventilador que presenta la cámara de secado solar (7,5 Kw/día) y haciendo una comparación de los costos por pie de madera aserrada entre el secado convencional, al aire libre y con energía solar, los resultados arrojaron notables diferencias a favor del secado solar (Tabla 1).

**Tabla 1: Comparación de costos de diferentes tipos de secado.**

Tipo de secado	CU madera	Costo
Intemperie	100%	US\$ 0.29/pie <sup>2</sup>
Energía solar	34%	US\$ 0.10/pie <sup>2</sup>
Secado convencional	69%	US\$ 0.20/pie <sup>2</sup>

Fuente: Taboada et al, 1996

Al mismo tiempo, los insumos para la construcción e instalación de este tipo de secaderos representan costos realmente accesibles (para pequeñas y medianas empresas argentinas en 1996) y no precisan mano de obra especializada para su instalación y manejo. En función de estos resultados, el secado solar se presenta como una tecnología posible de ser incorporada por las pequeñas y medianas empresas de primera transformación para aumentar el valor agregado de sus productos finales y así poder ampliar su rango de competitividad (Taboada et al., 1996).

Por otra parte, en Chubut (48° 58' Lat. Sur), secando madera aserrada a partir de una humedad promedio de 40%, se concluyó, que el secado solar es aceptable durante los meses de verano, disminuyendo notablemente su eficiencia hacia el invierno. También se indica que los contenidos de humedad fueron siempre menores por medio del secado solar respecto a la intemperie, y que también fue mayor la homogeneidad de distribución de la humedad en el lote (Jovanovski et al., 1995).

En otro ensayo realizado en Louisiana (31° Lat. Norte), ensayando dos modelos de secadero solar para el secado de tablas para distintos espesores, se determinó una duración del doble del tiempo a la intemperie frente al secado solar para alcanzar un 30% de humedad, y del triple para llegar al 20%, partiendo de alrededor de 100% de contenido de humedad (Loomley et al., 1979).

En la localidad de Río Piedras, Puerto Rico (18° Lat. Norte), se concluyó que el secado de tablas de "Caoba" (*Swietenia macrophylla*) de diferentes espesores, toma por secado solar la mitad y hasta la cuarta parte del tiempo que lleva al realizarlo a la intemperie, hasta un contenido de humedad final de 15%. En el mismo trabajo, las tablas de 2" (5.08 cm) de espesor de "Caoba" secadas hasta 11% en secadero y 20% al aire presentan igual magnitud de defectos excepto para encorvadura y combado, que son mayores en tablas secadas al aire (Chudnoff, 1966).

En la Universidad Estatal de Colorado (39° Lat. Norte), utilizando un secadero de tipo invernadero, se determinaron menores tiempos de secado y menor cantidad de defectos en el secado solar que a la intemperie (Troxell et al., 1968).

Por otra parte, se sugiere que la escasa presencia de grietas y rajaduras durante el secado de maderas por medio de secaderos solares de tipo invernadero o semi-invernadero, se debe a la rehumidificación que se produce durante las horas nocturnas (Plumpton, 1979).

En un trabajo realizado con tablas de diferentes especies y espesores en Brisbane (27° Lat. Sur), Queensland, se llegó a la conclusión de que el secado solar de madera es muy efectivo, lográndose bajos contenidos de humedad y buena calidad de secado. Por

Otra parte se determinó que en días buenos la temperatura dentro del secadero puede ser entre 18 y 24 °C superior a la registrada a la intemperie (Gough, 1981).

En un ensayo de secado de tablas de *Eucalyptus crebra* de 25 mm de espesor en un secadero tipo invernadero en Queensland (27° Lat. Sur), se observó que en 32 días las mismas pasaron de 32% a 12% de humedad durante el mes de marzo. Tablas de 40 mm de espesor de *Eucalyptus saligna* en agosto – setiembre, tomaron 62 días para pasar de 27% a 12% de humedad. También se determinó, que madera de pino de 25 mm de espesor, con una humedad inicial de 32%, alcanzó una humedad final de 12% después de 16 días en el mes de abril. Tablas de *Araucaria cunninghamii* con una humedad promedio de 30%, alcanzan un 15% en 13 días en el secadero, mientras que a la intemperie se llegó a 17% a los 25 días de iniciado el proceso, y no se observó secado adicional. Por otra parte con tablas de *Eucalyptus crebra* con 22% de humedad inicial, se alcanzó un 15% en 16 días. En el mismo período a la intemperie se llegó a 18%, aunque después de 30 días no había alcanzado el 15% de humedad (Palmer et al, 1992).

En Madison (43° Lat. Norte), utilizando un secadero de colector externo, se estudió el secado de tablas de *Quercus borealis* y *Acer spp.* de 2,9 centímetros de espesor desde el estado verde a 8% de humedad, en 54 y 26 días respectivamente. La temperatura dentro del secadero fue hasta 24,6 °C superior a la de la intemperie (Simpson et al, 1984).

En 1996, el Instituto de Ingeniería Agrícola de Trópicos y Subtrópicos de la Universidad de Hohenheim (Stuttgart, Alemania) desarrolló un nuevo secador, en cooperación con dos empresas : CAF- Santa Bárbara Ltda. (Martinho Campos, Brasil) y Thermo- System GmbH (Alfdorf-Pfahlbronn, Alemania). En 1996, desarrolló un prototipo, con una capacidad de 160 m<sup>3</sup> de madera que está operando con suceso en Martinho Campos, Minas Gerais (20° Lat. Sur). En agosto de 1998, un secador de 2 cámaras, con una capacidad de 400 m<sup>3</sup>, fue instalado en el mismo lugar. Además, un secador de 4 cámaras, con una capacidad de 800 m<sup>3</sup>, está en construcción en Teixeira de Freitas, en el estado de Bahia (13° Lat. Sur). El resultado de varias corridas de secado demostró que es posible secar en una cámara de secado solar hasta 200 m<sup>3</sup> de madera verde aserrada de eucalipto (humedad entre 50 y 80 %) a una humedad final de 12%, en un ciclo total de 22 a 28 días. La reducción de costos de secado no baja de un 30 a 50% en comparación con hornos convencionales modernos (Bauer et al, 1996).

En el mundo, hay una tendencia cada vez más fuerte a promover la producción de productos de mayor valor agregado en las industrias de aprovechamiento primario. Para evitar defectos y contracciones en los productos finales la madera debe estar seca antes de su elaboración final (Jovanovski, 1995).

El mercado de los productos madereros de primera transformación y remanufacturas exige cada vez más la utilización de madera con porcentajes de humedad generalmente inferiores al 18/20 %, valores posibles de ser alcanzados con márgenes adecuados de rentabilidad mediante cámaras de secado cuando se trata de producciones en las que el factor tiempo es una variable a tener en cuenta (Taboada et al. 1996).

Básicamente hay dos métodos para secar la madera: al aire libre (secado natural) y en cámaras de secado (secado artificial convencional). Existe un tercer método, el secado solar, cuya importancia radica en el bajo costo operativo de las cámaras y en las propiedades no contaminantes de la energía utilizada (Jovanovski, 1995).

El secado artificial convencional utiliza al aire como medio de extracción de la humedad de la madera. El horno o estufa es una construcción con una serie de dispositivos o elementos que buscan controlar los distintos factores que intervienen en el proceso de secado. Los distintos elementos que se incorporan en un horno de secar madera pueden agruparse de la siguiente manera:

a) Elementos para calefaccionar el aire. Los sistemas de calefacción indirecta son los más empleados, y entre ellos el más utilizado es el vapor. (También se utiliza electricidad, combustibles, etc.).

b) Elementos para variar la humedad del aire (caños para inyección de vapor y chimeneas para intercambio de aire con el exterior).

c) Elementos para la circulación del aire (los principales son los ventiladores, pero también se utilizan deflectores).

d) Dispositivos de aislación (es importante por el reflejo que tienen las pérdidas de calor en la eficiencia del proceso y en el costo de este).

e) Instrumentos y dispositivos de contralor (es imprescindible controlar la temperatura y la humedad relativa del aire utilizando termómetros y psicrómetros).

El secado de madera a base de energía solar, se ha desarrollado mucho en los últimos 35 años. Se trata de cámaras de tamaño reducido, que se han construido con materiales transparentes en el techo y en la mayoría de las paredes; el objetivo es aprovechar la energía solar como medio de calefaccionar el aire de la cámara y secar así la madera depositada en ella. A medida que los ensayos con este dispositivo fueron avanzando en diferentes países (USA, India, Uganda, Sudáfrica, Rep. Malgache), se introdujeron mejoras como ventiladores, humidificadores, aislación térmica en

---

superficies externas. En regiones con elevado número de horas de sol a través del año, las investigaciones han demostrado que el sistema es de interés, puesto que en comparación con el secado a la intemperie, se reduce la duración del proceso, y se puede alcanzar un contenido de humedad menor; y en comparación con el secado en hornos, permite utilizar una fuente de energía de bajo costo (Tuset y Durán, 1979).

La utilización de cámaras de secado por energía solar para el secado artificial de madera, agrega un factor que juega un papel fundamental en la conformación de los costos finales de esta operación: el aumento del precio de la energía producida tradicionalmente (electricidad, petróleo y sus derivados) es una de las tendencias que se observa en la economía tradicional y que ha llevado al inicio de numerosas investigaciones sobre fuentes energéticas alternativas. Actualmente, el secado de madera a través de energía solar gana cada vez más importancia en el mundo.

Debido a su bajo costo se logra una mejora en la competitividad del producto secado con energía solar, debiéndose agregar también, que desde el punto de vista ecológico este tipo de secado constituye una respuesta a problemas de contaminación ambiental (Taboada et al, 1996).

El número de diseños diferentes de secaderos solares se ha incrementado rápidamente en los últimos años con una tendencia a estructuras mejor aisladas, mayor sofisticación en el control de humedad, circulación de aire y mejoras en las ventilas.

Hoy en día, las diferentes categorías de secaderos solares son:

1. Secaderos de tipo invernadero, con todas las paredes y el techo cubiertos de material transparente y colectores solares dentro de la estructura. Estos a su vez se dividen en tres tipos:

- a) De convección simple sin ventiladores y ventilación simple.
- b) Secaderos con ventiladores y ventilación simple
- c) Secaderos con ventiladores y ventilación controlada a través de la humedad o la humedad y la temperatura.

2. Secaderos de tipo semi-invernadero con techo y alguna de sus paredes construidos con material transparente mientras que el resto de las paredes y el piso están construidos con material aislante para reducir la pérdida de energía.

Dentro de éstos hay dos tipos:

- a) Secadero con un solo colector solar integrado al recinto de secado
- b) Secaderos con uno o más colectores solares tipo caja ubicados adyacentes al recinto de secado. Los colectores también pueden estar dentro del recinto de secado, y mediante el uso de ventilas, éstos se pueden aislar del recinto de secado.

3. Secaderos con colectores externos, conectados al recinto de secado mediante ductos aislados.

4. Secaderos solares equipados con un dehumidificador para reducir la humedad del aire que circula entre la madera y para retornar al sistema la energía liberada en la condensación del vapor de agua (Plumtree, 1985).

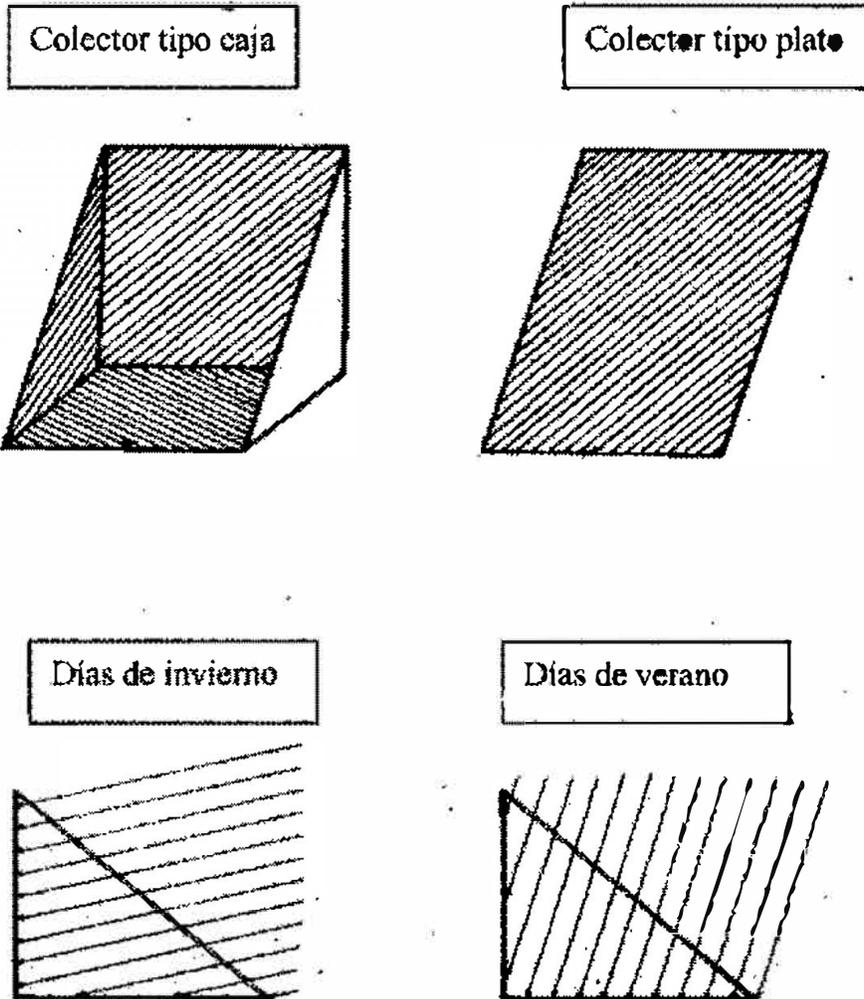
En lo que respecta a los colectores solares también se han mejorado mucho en los últimos años. Los dos principales modelos de colectores solares son

- a) colector solar tipo plato.
- b) colector solar tipo caja.

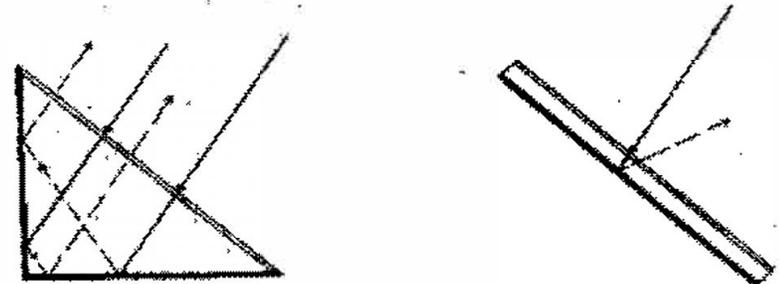
El colector solar tipo plato tiende a ser sustituido por el colector tipo caja. Ambos pueden observarse en la Figura 1. Las ventajas del colector tipo caja son:

- ⇒ Mayor superficie de absorción (las tres paredes y el piso). Este tipo de colectores aumenta la superficie de absorción en más de un 100% con igual cantidad de material transparente, comparado con los colectores de tipo plato.
- ⇒ Permite constante intercepción de los rayos solares independientemente del ángulo de incidencia de éstos.
- ⇒ Menor pérdida de radiación por reflexión. El colector tipo caja permite que un rayo reflejado sea absorbido por otra de las caras. (Lumley, et al., 1978)
- ⇒ Por otra parte, estos diseños requieren una mayor inversión y mayor complejidad de operación (Lumley y Choong, 1979; Little, 1979; citados por Burke, E.J., 1981).

Figura 1: Diagrama de los colectores solares tipo caja y tipo plato.



Ángulo de incidencia de la radiación solar en diferentes estaciones. La superficie colectora perpendicular permite constante intercepción de los rayos solares en todas las estaciones.



Comparación de pérdida de radiación reflejada entre los dos tipos de colectores. En el colector tipo caja un rayo reflejado por una superficie puede ser absorbida por otra de las superficies.

## 2.1 FACTORES QUE AFECTAN LA EFICIENCIA DEL SECADO SOLAR.

Debido a la relativa lentitud y a la dependencia climática que presentan los secaderos solares, se a trabajado y estudiado mucho para lograr que sean más eficientes.

La eficiencia de secado se determina mediante la relación entre la cantidad de agua removida desde las tablas y la energía que entra al secadero (Plumptre, 1985).

La eficiencia de un secadero solar es afectada por factores que dependen o no de la carga utilizada:

### a) Factores no dependientes de la carga utilizada:

⇒ Latitud.

⇒ Clima (temperatura, humedad, insolación)

⇒ Diseño del secadero.

Inicialmente, el uso de secaderos solares se difundió, en regiones de bajas latitudes con altas temperaturas y prolongados períodos de insolación, por ejemplo, los estudios de Chudnoff (1966) realizados en Puerto Rico.

Posteriormente, debido a la invención de nuevos modelos de secaderos y a un aumento en su eficiencia, su uso se extendió a regiones de mayor latitud y condiciones climáticas no tan favorables para el secado solar, por ejemplo, los ensayos realizados en Chubut (Jovanovski, 1995).

Algunas de las principales innovaciones de los últimos años son por ejemplo, importantes mejoras en el sistema de calentamiento del horno, microprocesadores para control de ventilas y circulación de aire, dispositivos de condensación de agua para aumentar la eliminación de ésta en forma líquida, mejoras en el diseño de los colectores, mejoras en los materiales aislantes incluyendo vidrios y diferentes tipos de materiales plásticos (PVF, PVC, polyester.). Todas estas mejoras posibilitaron un aumento en la absorción de la energía solar.

b) Factores dependientes de la carga utilizada:

- ⇒ Contenido de humedad inicial y final de la carga
- ⇒ Especie utilizada y permeabilidad de ésta
- ⇒ Espesor de tablas, tamaño de separadores y forma del castillo.

El factor limitante para la gran mayoría de los procesos de secado está determinado por la tasa de movimiento de agua desde el interior de las tablas, y no tanto por la tasa de remoción desde la superficie de las mismas. A esto se debe la importancia de los tres puntos anteriores.

La manera en que ocurre el movimiento de la humedad desde el interior hacia la superficie depende de:

A) Los rangos de contenido de humedad dentro de las tablas.

- 1) Humedad por encima del (PSF) punto de saturación de las fibras (agua libre)
- 2) Humedad por debajo del punto de saturación de las fibras (agua higroscópica)

B) Fuerzas que producen el movimiento.

- 1) Sobre el PSF: gradiente de presión total.
- 2) Bajo el PSF: gradiente higroscópico

C) Caminos para el movimiento de la humedad.

- 1) Sobre el PSF: toda la estructura hueca continua.
- 2) Bajo el PSF: paredes celulares, huecos en series y caminos paralelos.

D) Tipos de movimientos

- 1) Sobre PSF: flujo masivo (hidrodinámico).
- 2) Bajo el PSF: difusión.

Por otra parte, se debe recordar que:

Si el factor limitante es la remoción de humedad desde la superficie de la madera, el tiempo de secado es directamente proporcional al espesor y a la densidad de las tablas, inversamente proporcional a la depresión del bulbo húmedo e inversa aproximadamente proporcional a la velocidad del aire.

Si el factor limitante es la difusión de humedad hacia la superficie, el tiempo es directamente proporcional al cuadrado del espesor y al cuadrado de la densidad de las tablas, e inversamente proporcional a la presión de vapor (o humedad absoluta) a la temperatura del bulbo seco a 100% de humedad (Arthur Hart, 1968).

## 2.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL SECADO SOLAR

El secado solar tiene varias características muy positivas:

- ⇒ alta calidad de secado particularmente para especies de madera dura y de secado lento (*Quercus spp.*).
- ⇒ habilidad de secar madera por debajo de la humedad de equilibrio, (a diferencia del secado a la intemperie en gran cantidad de países).
- ⇒ bajo costo de capital.
- ⇒ bajo costo de operación y bajo consumo de energía (producida convencionalmente).
- ⇒ fuente ilimitada de energía, el sol.
- ⇒ fácilmente operable y un mínimo control dan calidades de secado adecuadas.
- ⇒ relativamente fáciles de construir.

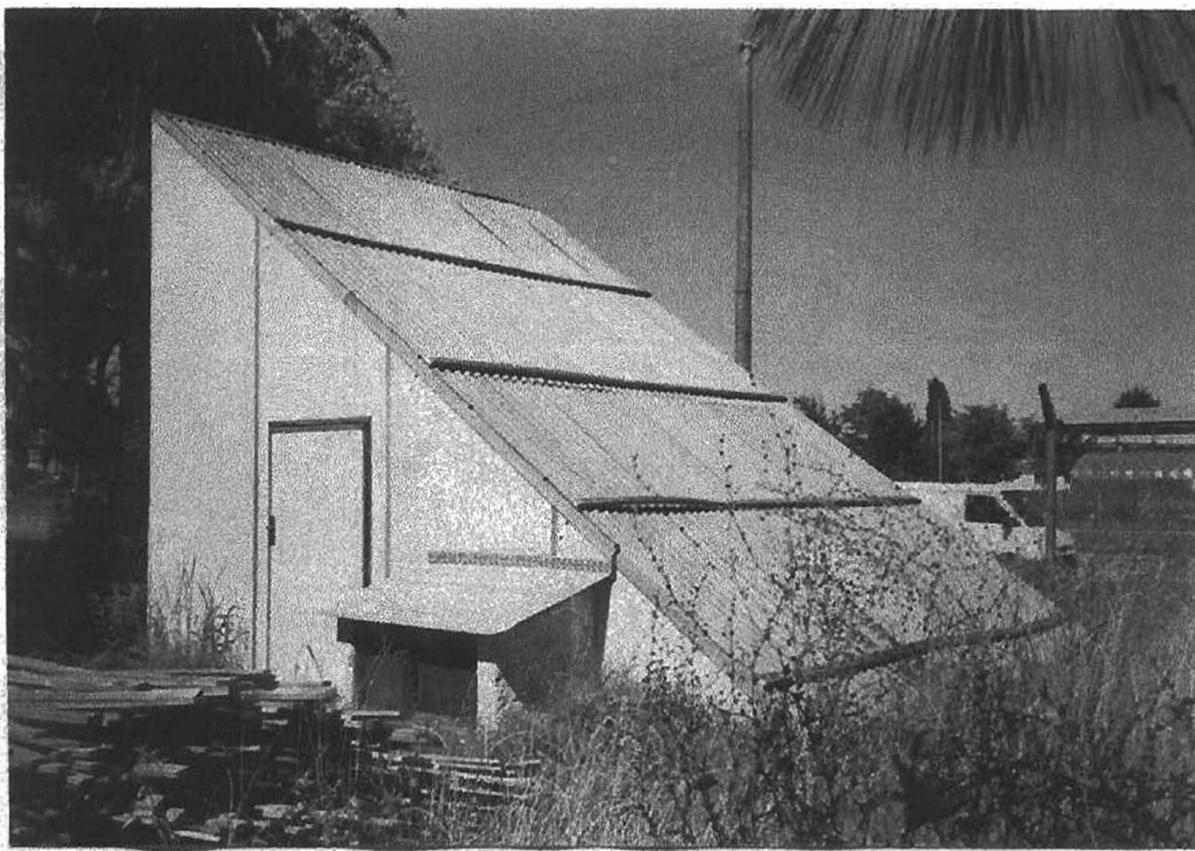
Las principales desventajas del secado solar son:

- ⇒ alta dependencia de las condiciones climáticas.
- ⇒ a bajas temperaturas, los períodos de secado son largos comparados con aquellos de las cámaras convencionales de secado. (Plumptre, 1985)

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS.

Se utilizó el secadero solar de la Facultad de Agronomía; es un secadero de tipo semi-invernadero según la clasificación de Alvarez Noves y Fernandez Golfín Seco (1989), citados por Jovanovsky (1995),(Foto 1 y Anexo 1). El techo esta formado por chapas de fibra de vidrio dispuestas con una inclinación respecto al plano horizontal de  $34^\circ$  hacia el norte, y una superficie total de captación de  $24.46 \text{ m}^2$ .

**Foto 1: Vista del secadero solar semi-invernadero utilizado.**

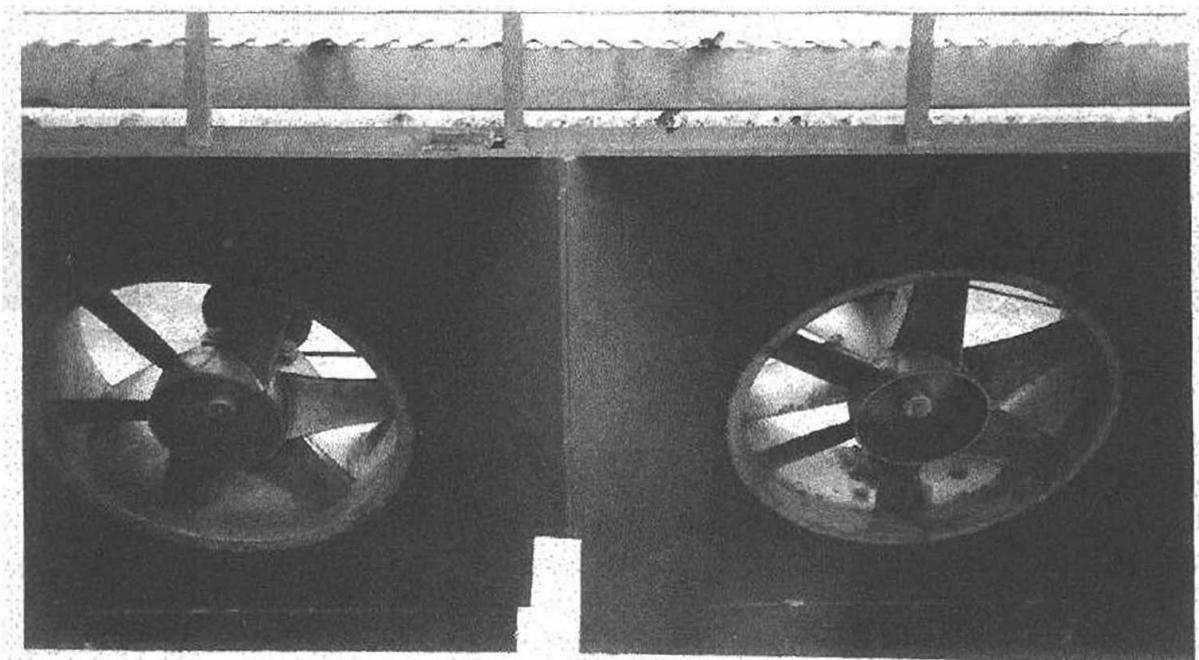


El resto de la estructura esta formada por isopaneles autoestructurales que consisten en un núcleo de poliuretano expandido, actuando como aislante térmico, y doble cobertura de chapa galvanizada, travesaños de madera de sección rectangular, perfiles de aluminio anodizado en las uniones de las paredes, y un armazón de madera donde están instalados los ventiladores, dividiendo el recinto en dos sectores (Foto 2) Dichos sectores son: el colector solar (tipo caja) y el recinto donde se deposita la madera a secar. La base del secadero es de hormigón aislado con poliuretano. Todo el interior del secadero está pintado de negro.

El colector es tipo caja, según la clasificación de Lumley y Choong (1978).

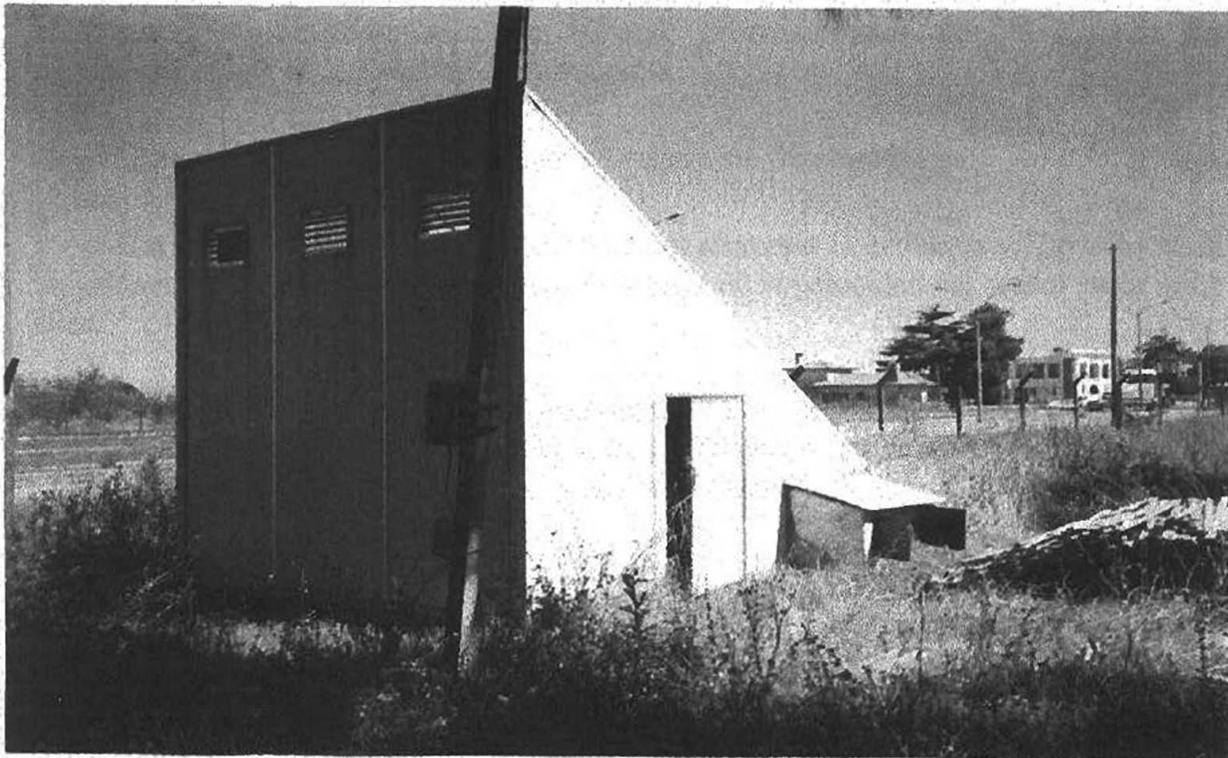
La circulación de aire dentro del secadero es forzada por acción de dos ventiladores de 0.6 m. de diámetro, los cuales son accionados por un motor de 1,5 CV que gira a 1400 r.p.m., dando al aire una velocidad de 3 m/s (Foto 2).

**Foto 2: Vista de los ventiladores del secadero solar utilizado.**



La humedad relativa dentro del secadero puede manejarse parcialmente por medio de la apertura o cierre manual de 3 ventilas ubicadas en la pared sur del secadero (Foto 3).

**Foto 3: Vista de las ventilas del secadero solar utilizado.**



Para el cálculo del contenido de humedad inicial de las diferentes cargas se seleccionaron 10 tablas al azar de cada estiba. De dichas tablas se cortaron muestras de 500 mm, y de cada una de éstas 2 probetas de 25 mm. Las 20 probetas fueron pesadas tanto al contenido de humedad inicial como después de alcanzar el estado anhidro. El mismo se alcanzó mediante el secado en estufa de laboratorio a  $100 \pm 5$  °C, hasta peso constante luego de dos pesadas sucesivas; las pesadas se realizaron cada 12 horas. El promedio de ambas se consideró como la humedad inicial de la carga.

Para la pesada de las muestras, se utilizó una balanza con precisión a la centésima de gramo en el caso de muestras que no superaran los 1000 gramos, para muestras mayores la precisión es a la décima de gramo.

El seguimiento de la humedad y la temperatura dentro del secadero se llevó a cabo utilizando un termohigrógrafo Cole Parmer modelo 37250-10; cambiando semanalmente las bandas de papel.

Los datos de humedad relativa y temperatura fuera del secadero se obtuvieron de la Estación Agrometeorológica de Sayago, proporcionados por la Cátedra de Agrometeorología de la Facultad de Agronomía.

Para cortar las probetas se utilizó una sierra sin fin eléctrica.

La velocidad y distribución del viento al atravesar la estiba se midió colocando un velómetro (ALNOR) entre las tablas, captando así la velocidad del aire al pasar entre ellas.

Las distintas variables fueron analizadas a través de modelos lineares, incluyendo como efectos, el tipo de secado, posición de las tablas en altura en la pila, efecto de la velocidad del viento en el secadero, posición horizontal de las tablas y fecha, según corresponda.

Para todos los ensayos se utilizaron estimaciones de Máxima Verosimilitud Restringida y pruebas de Razón de Verosimilitud.

A partir de las medidas ajustadas de humedad relativa, se ajustó el siguiente modelo no lineal para modelar el proceso de secado:

$$Y = A - B(1 - e^{-ct})$$

siendo:

A : Contenido de humedad inicial de las tablas.

B : Pérdida de humedad en el proceso.

$(1 - e^{-ct})$  : Velocidad de secado. Donde: c: constante  
t: tiempo

Para todo el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (SAS Institute, Inc. Cary N.C., USA. 1997. Ver. 6.11).

### 3.1. ENSAYO DE *Eucalyptus grandis*.

#### 3.1.1. Conducción del secado de tablas de *Eucalyptus grandis*

El 25 de febrero de 1998, se armó una estiba en el interior del secadero y otra fuera de éste, ambas con características similares. Se utilizaron tablas de *Eucalyptus grandis* oreadas, cuyas dimensiones eran de 3.8 x 150 x 2200 mm.

La estiba armada dentro del secadero, presentaba 14 camadas de 7 tablas cada una, sin separación entre las tablas. La primera camada estaba a 520 mm del suelo, y la altura total de la estiba fue de 1330 mm.

Las ventilas se mantuvieron abiertas durante todo el proceso. Los ventiladores funcionaron todos los días de 9 a 21 hs.

La estiba armada a la intemperie presentaba también 14 camadas de 7 tablas cada una, pero con una separación entre tablas de aproximadamente 30 mm. Además de las 14 camadas, se agregó otra camada en la parte superior, sin separación entre las tablas, actuando esta como techo protector. La altura de la camada inferior fue de 720 mm y la altura total de la estiba fue de 1530 mm. Esta estiba se armó a mayor distancia del suelo que la estiba dentro del secadero a efectos de facilitar la circulación del viento y disminuir la interferencia de las malezas existentes.

Entre camada y camada se dispusieron 3 separadores de 20 x 50 mm de sección transversal, fabricados con la misma madera y con similares condiciones de humedad.

##### 3.1.1.1. Control de humedad de la carga.

La humedad inicial calculada fue de 62.8% para la estiba en el secadero y de 68.2% para la estiba a la intemperie. Así mismo se registró el peso inicial de las 10 muestras (500 mm de largo) tomadas del total de las 98 tablas de cada estiba, y con éste y sus datos de humedad se calculó el peso anhidro teórico de cada una de las muestras para el posterior seguimiento de la evolución del proceso de secado.

Los extremos de las muestras se recubrieron con pintura a los efectos de evitar un secado excesivamente rápido. El peso de las muestras se tomó una vez por semana durante todo el proceso de secado, y con él se calculó el contenido de humedad. El

proceso finalizó cuando el contenido final de las muestras dentro del secadero fue de aproximadamente 12 %, lo cual ocurrió el 13 de mayo de 1998.

Finalizado el secado, se realizó una medición del contenido de humedad por medio de un xilohigrómetro de resistencia (GANN modelo H35), para visualizar diferencias en la distribución de la humedad en la carga. Se tomaron en cada una de las tablas tres medidas, una a 10 cm de cada extremo de la tabla y una al medio.

### 3.1.1.2. Variables registradas

Las variables estudiadas durante el proceso de secado fueron registradas con los instrumentos descritos en el punto 3.

Dichas variables fueron las siguientes:

- ⇒ Humedad de la madera en las muestras.
- ⇒ Temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del secadero
- ⇒ Humedad final de todas las tablas de la estiba.
- ⇒ Velocidad del viento dentro del secadero.

Para analizar el efecto del viento en el secado de la madera dentro del secadero, se midió la velocidad de éste al pasar entre las 12 camadas del castillo (altura), en 4 zonas de la pila (a los extremos y al medio).

### 3.1.1.3. Evaluación del ensayo.

Se evaluaron los siguientes aspectos:

- ⇒ Humedad final alcanzada
- ⇒ Comparación de curvas de secado
- ⇒ Tasa de secado
- ⇒ Homogeneidad y distribución de la humedad en las estibas
- ⇒ Influencia de la posición (superior, media e inferior) y orientación (norte o sur) de las tablas en la estiba.

En el secado de maderas de *Eucalyptus grandis* no fueron evaluados los defectos causados por el secado.

### 3.2. ENSAYO DE *Eucalyptus tereticornis*.

#### 3.2.1. Conducción del secado de tablas de *Eucalyptus tereticornis*.

El 9 de setiembre de 1998 se introdujo en el secadero una carga de tablas oreadas de *Eucalyptus tereticornis*. Las tablas, de 1500 x 50 x 15 mm, deberían llegar a un contenido de humedad final de aproximadamente 12 % para ser utilizadas luego para la fabricación de tablas de parquet.

La estiba completa (891 tablas), dentro del secadero, estaba formada por dos castillos de 16 y 17 camadas de 27 tablas cada una.

Para separar cada camada se utilizaron dos separadores de la misma madera e iguales dimensiones y condiciones de humedad que las tablas a secar.

La estiba estaba apoyada sobre tirantes de madera de sección rectangular, los cuales a su vez se separaban del piso del secadero por rolos de madera de 50 cm de largo y 25 cm de diámetro.

Los ventiladores funcionaron todos los días de 9:00 a 21:00 hs. excepto en un lapso de aproximadamente dos semanas donde no hubo abastecimiento eléctrico. Las ventilas permanecieron abiertas hasta el 21 de octubre, cuando fueron cerradas para acelerar el secado en las etapas finales.

#### 3.2.1.1. Control de humedad de la carga

Con el procedimiento descrito en el punto 3, se calculó el contenido de humedad de cada probeta (cada una de 25 mm), y el promedio de estas se consideró como la humedad inicial de la carga. El contenido de humedad inicial promedio de las tablas calculado fue de 26.8%. Asimismo se registró el peso inicial de las 10 muestras (500 mm de largo) de un total de 891 tablas de la estiba, y con éste y sus datos de humedad se calculó el peso anhidro teórico de cada una de las muestras para el posterior seguimiento de la evolución del proceso de secado.

Los extremos de las muestras se recubrieron con pintura a los efectos de evitar un secado excesivamente rápido. El peso de las muestras se tomó una vez por semana durante todo el proceso de secado, y con él se calculó el contenido de humedad. El proceso finalizó cuando el contenido de humedad final de las muestras dentro del

secadero fue de aproximadamente 12 %, lo cual ocurrió el 4 de noviembre luego de permanecer en el secadero 57 días.

Al considerar finalizado el proceso de secado, se realizó una medición del contenido de humedad utilizando un xilohigrómetro. El objetivo de esta medición era visualizar posibles diferencias en homogeneidad de distribución de la humedad en la carga. La medición se realizó en las tablas número 3, 12 y 23 (plano horizontal) de las camadas número 3, 8 y 14 (plano vertical) de cada castillo, de modo de que la muestra fuera representativa de toda la carga. Sobre cada tabla se realizaron dos mediciones; alcanzando un total de 18 datos de contenido de humedad para toda la estiba.

### 3.2.1.2. Variables registradas.

Las variables estudiadas durante el proceso de secado fueron registradas con los instrumentos descritos en el punto 3.

Dichas variables fueron las siguientes:

- ⇒ Peso semanal de las muestras.
- ⇒ Humedad de la madera en las muestras.
- ⇒ Temperatura y humedad relativa dentro del secadero.
- ⇒ Humedad final de las tablas.
- ⇒ Velocidad del viento dentro del secadero.

Para analizar el efecto del viento en el secado de la madera dentro del secadero, se midió la velocidad de este al pasar entre las camadas de la pila (altura de camada, 18 posiciones), en 4 zonas diferentes (A: puerta secadero, D: pared opuesta a la puerta, B y C: posiciones intermedias).

### 3.2.1.3. Evaluación del ensayo

El ensayo tuvo como objetivo la evaluación de los siguientes aspectos:

- ⇒ Humedad final alcanzada.
- ⇒ Comparación de curvas de secado.
- ⇒ Tasa de secado.
- ⇒ Homogeneidad de distribución de la humedad en la estiba.

⇒Influencia de la posición y orientación de las tablas en la estiba.

En el secado de maderas de *Eucalyptus tereticornis* no se evaluaron los defectos causados por el secado, ya que desde el inicio las tablas estaban colapsadas y con defectos de secado provocadas durante la etapa de secado a la intemperie, previa a la introducción de éstas al secadero.

### 3.3. ENSAYO DE *Pinus elliotti*.

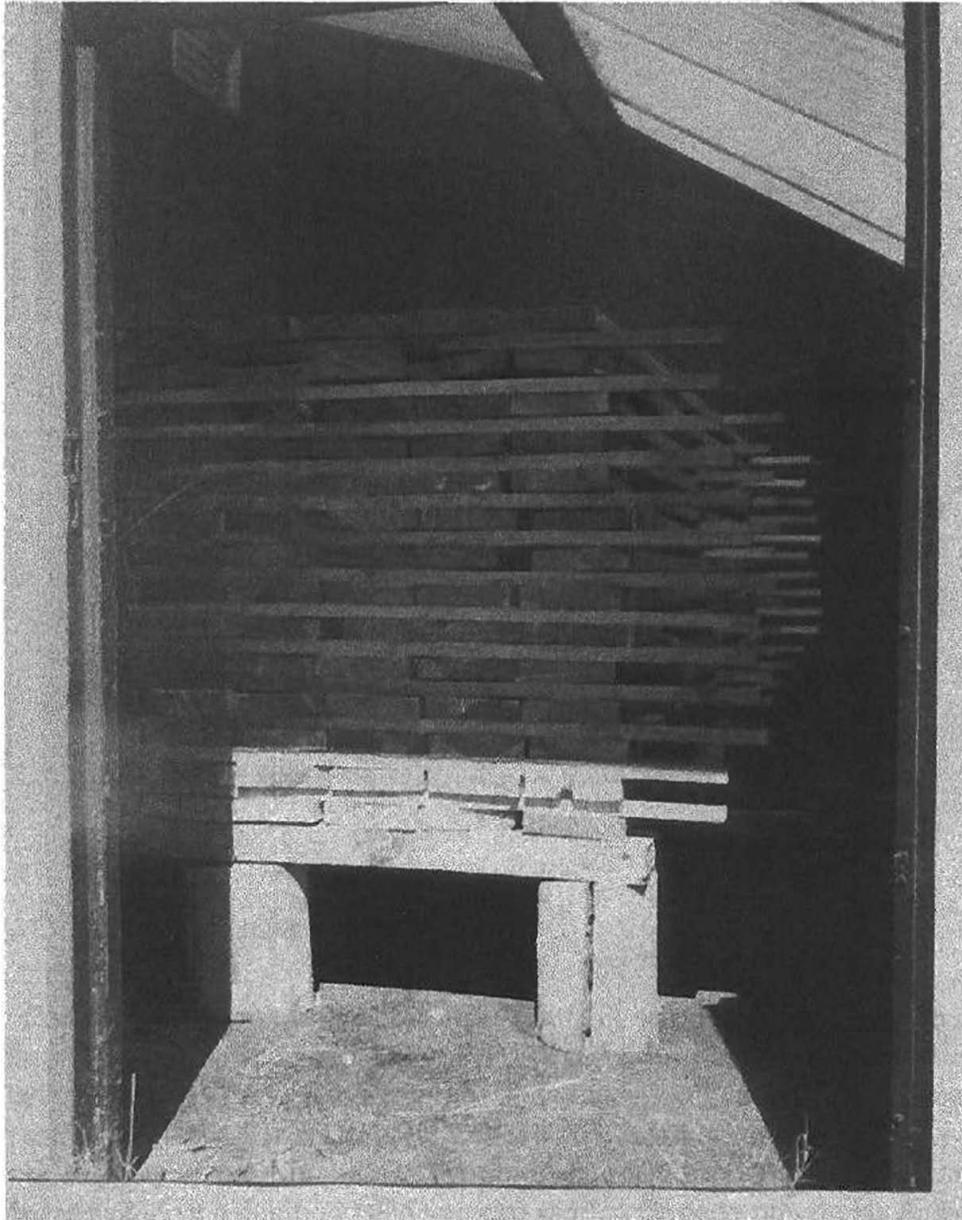
#### 3.3.1. Conducción del secado de tablas de *Pinus elliotti*.

En el tercer ensayo realizado, se armaron dos estibas con características similares; una dentro del secadero y otra fuera de éste. Dichas estibas se armaron el 24 de noviembre de 1998, y se utilizaron tablas de *Pinus elliotti* cuyas dimensiones eran de 2500 x 150 x 38.1 mm. Las mismas se dispusieron en 16 camadas de 8 tablas cada una. En el castillo dentro del secadero, no se dejó separación entre las tablas de cada camada, mientras que en el castillo a la intemperie, se dejaron aproximadamente 30 mm de separación entre las tablas. Entre camada y camada se dispusieron 3 separadores de 50 x 12.7 x 1200 mm.

Mediante tocones de *Eucalyptus ssp* .y travesaños y largueros de madera se realizó la separación entre la base de la estiba y el suelo. Al igual que en el ensayo 1, esta separación fue de 40 cm en el interior del secadero, y de 60 cm a la intemperie, a los efectos de evitar la disminución de la velocidad del viento por el efecto de las malezas (Fotos 4 y 5).

Las ventilas se mantuvieron abiertas durante todo el proceso y los ventiladores funcionaron todos los días de 9:00 a 21:00 hs.

**Foto 4: Vista de la estiba de *Pinus elliotti* dentro del secadero.**



**Foto 5: Vista de la estiba de *Pinus elliotti* a la intemperie.**



#### 3.3.1.1. Control de humedad de la carga

Con el procedimiento descrito en el punto 3, se calculó el contenido de humedad de cada probeta (cada una de 25 mm), y el promedio de estas se consideró como la humedad inicial de la carga. El contenido de humedad inicial de la carga fue de 44.19% para la estiba realizada a la intemperie y de 38.55% para la realizada en el secadero. Así mismo se registró el peso inicial de las muestras (500 mm de largo), y con éste y sus datos de humedad se calculó el peso anhidro teórico de cada una de las muestras para el posterior seguimiento de la evolución del proceso de secado.

Los extremos de las muestras se recubrieron con pintura a los efectos de evitar un secado excesivamente rápido (Foto 6). El peso de las muestras se tomó una vez por semana durante todo el proceso de secado, y con él se calculó el contenido de humedad. El proceso finalizó cuando el contenido final de las muestras dentro del secadero fue de aproximadamente 12%, lo cual ocurrió el 28 de enero de 1999. En dicha fecha, el

contenido de humedad de las tablas dentro del secadero fue de 13.03%, mientras que las tablas secadas a la intemperie presentaban un 23.55% de humedad.

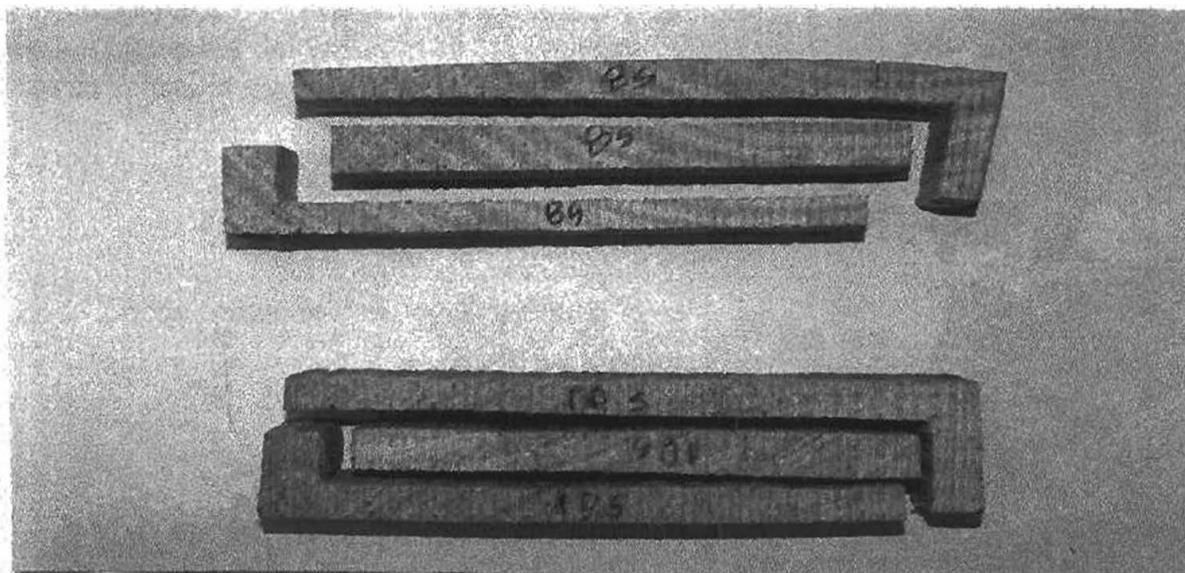
**Foto 6: Pesada semanal de muestras de *Pinus elliotti*.**



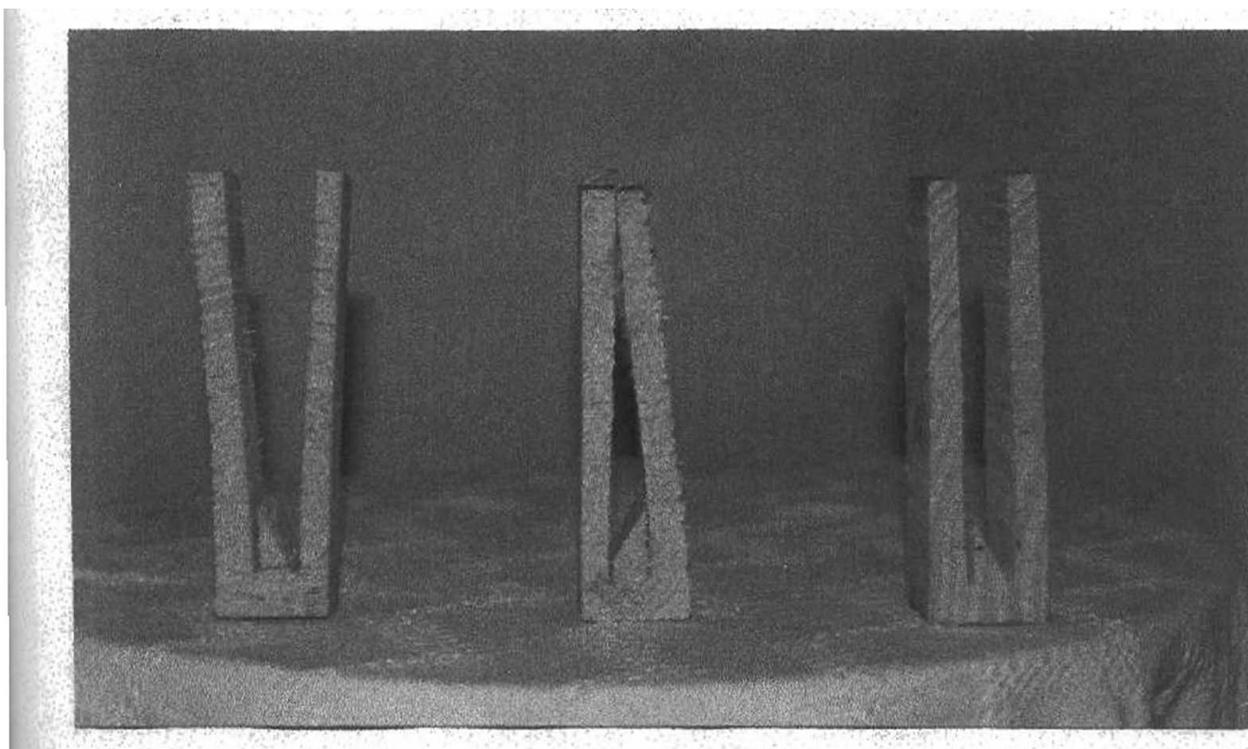
Al considerar finalizado el proceso de secado, de cada muestra se cortaron dos probetas, una para observar las diferencias de humedad en el interior y exterior de la madera (Foto 7) y la otra para analizar las tensiones producidas durante el proceso de secado (Foto 8).

Cada sección de las probetas de humedad fue pesada tanto al contenido de humedad que tenían al finalizar el proceso de secado, como después de alcanzar el estado anhidro al ser secadas en estufa de laboratorio a  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta alcanzar peso constante.

**Foto 7: Probetas de humedad (*P. elliotti*).**



**Foto 8: Probetas de tensión de secado(*P. elliotti*).**



Para conocer las diferencias de tensiones se realizó un test de probetas de tensión. Dicho test no cuantifica la tensión, sino que indica si existe o no un gradiente de tensión que causa deformación en las probetas. El test planteado por Fuller en 1995, se basa en aplicar la siguiente fórmula:

$$PR = (W - W') / L^2$$

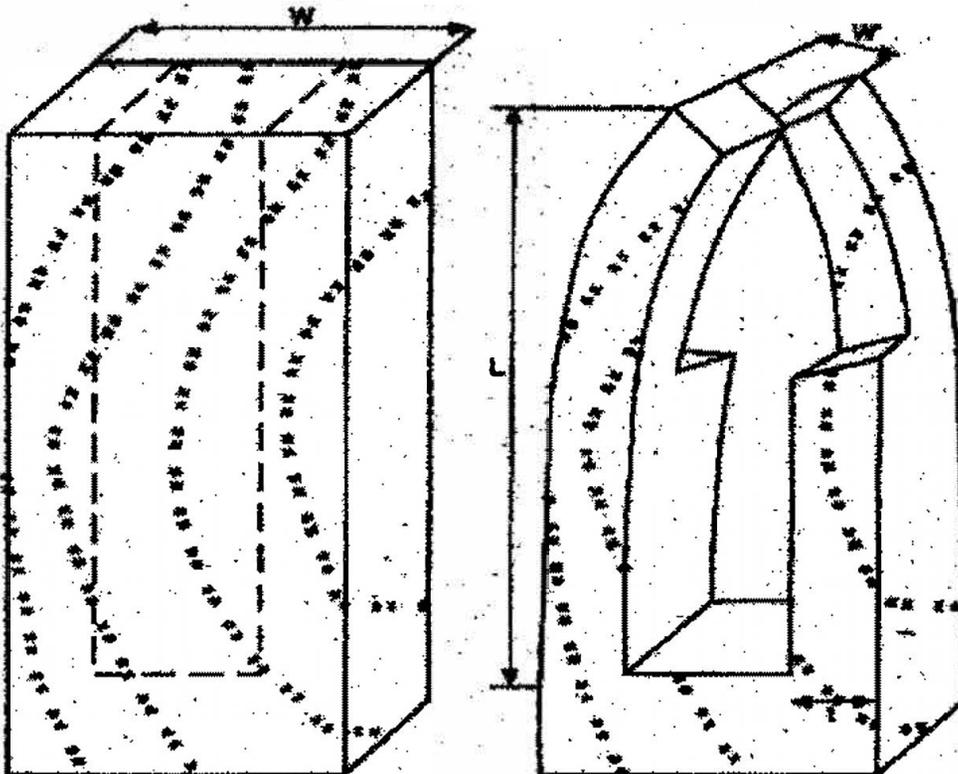
Donde , como se observa en la Figura 2:

W : distancia entre los extremos de los brazos de la probeta antes del corte

W' : distancia entre los extremos de los brazos de la probeta después del corte.

L : largo del brazo de la probeta.

Figura 2: Test de Fuller para probetas de tensión.



### 3.3.1.2. Variables registradas.

Las variables registradas durante el proceso de secado fueron las siguientes:

- ⇒ Humedad de la madera en las muestras.
- ⇒ Temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del secadero.
- ⇒ Velocidad del viento dentro del secadero.

Para analizar el efecto del viento en el secado de la madera dentro del secadero, se midió la velocidad de este al pasar entre las camadas del castillo (15 posiciones) en 3 zonas de la pila (extremo este, medio y extremo oeste).

### 3.3.1.3. Evaluación del ensayo.

Se evaluaron los siguientes aspectos:

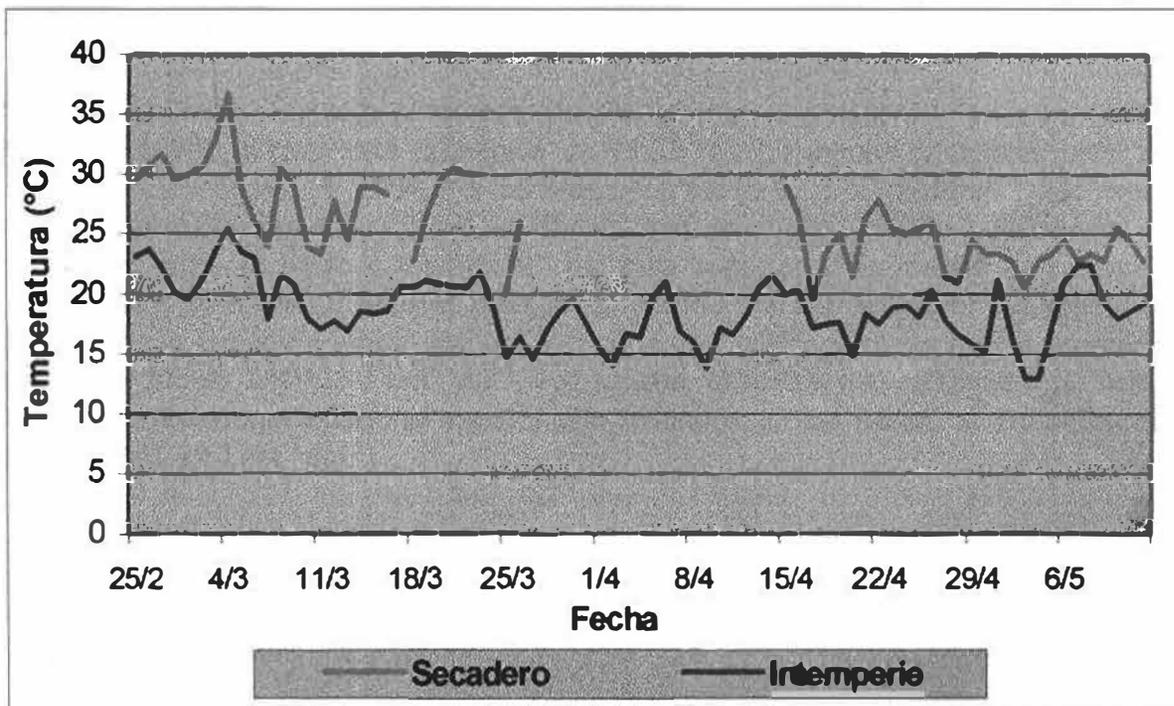
- ⇒ Humedad final alcanzada
- ⇒ Comparación de curvas de secado
- ⇒ Tasa de secado
- ⇒ Influencia de la posición (superior, media e inferior) y orientación (norte o sur) de las tablas en la estiba.
- ⇒ Homogeneidad y distribución de la humedad en las estibas.
- ⇒ Tensión interna de tablas.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

##### 4.1. ENSAYO DE *Eucalyptus grandis*.

##### 4.1.1. Evolución de la temperatura.

**Gráfica 1: Evolución de la temperatura media diaria en el secadero y a la intemperie (*E. grandis*).**



Cabe aclarar, que se descompuso el termohigrógrafo, por lo que no se pudieron registrar datos de temperatura en 22 días ni de humedad relativa en 25 días del proceso de secado.

En todos los días en los que se registraron datos, se observó que la temperatura dentro del secadero siempre fue mayor que a la intemperie, no registrándose un aumento en las diferencias a medida que avanzaba el proceso.

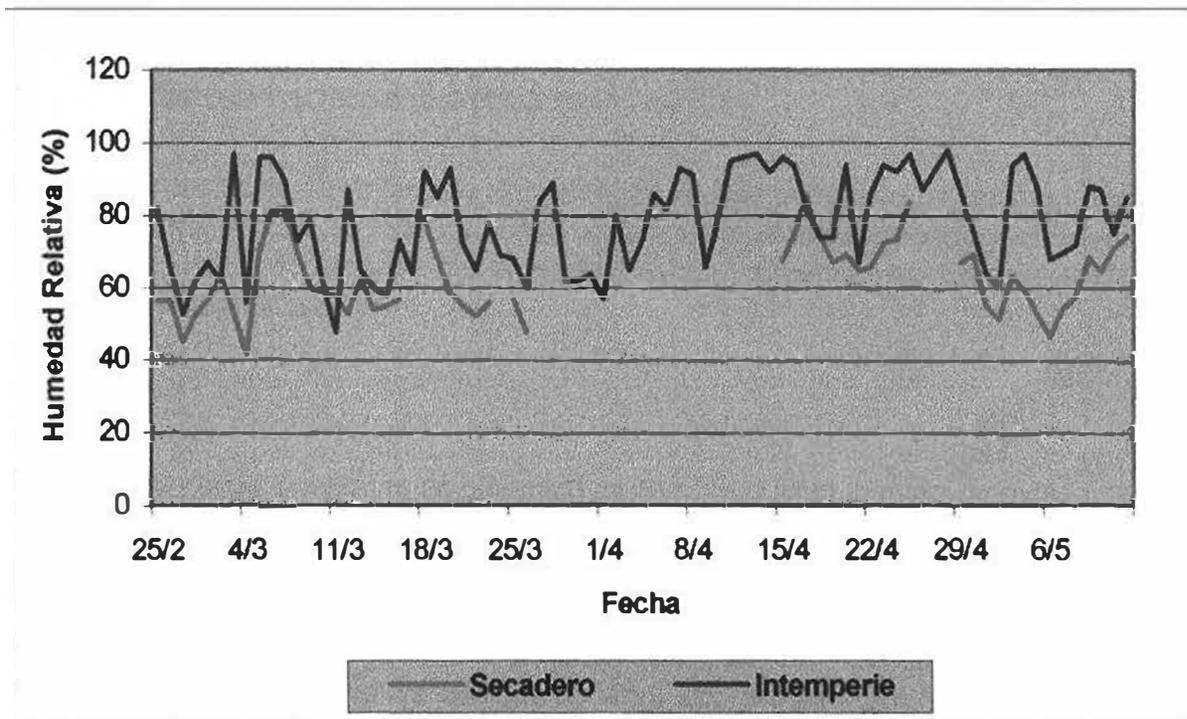
Cuando la madera es introducida en el secadero con un contenido de humedad muy elevado, suele ocurrir inicialmente en el proceso de secado, una menor diferencia de temperatura entre el secadero y la intemperie, debido a la evaporación de agua libre desde las tablas. En este caso no ocurrió lo anteriormente dicho debido quizás a que el contenido de humedad inicial de las tablas no era lo suficientemente elevado como para que este fenómeno se produjera.

Por otra parte, las diferencias de temperatura al final del proceso tampoco son muy importantes, y esto se debe a la disminución de horas de sol debido a la entrada del otoño, lo que demuestra la disminución de la capacidad de secado de este tipo de secadero en esta época del año.

La máxima diferencia de temperatura media entre el secadero y la intemperie se registró el 4/3/98, siendo esta diferencia de 11.22 °C. La menor diferencia entre las temperaturas se registró el 7/5/98 y dicha diferencia fue de 0.28 °C (Gráfica 1). Se puede decir que la radiación solar global el día en que se dio la máxima diferencia de temperatura entre secadero e intemperie, fue muy superior al promedio de radiación solar global a lo largo de todo el período de secado. El día de mayor diferencia de temperatura, la radiación global fue de 2248.56 J cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, mientras que el promedio del período fue de 1249.39 J cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>. Así mismo, el día en que se registró la menor diferencia entre temperaturas, se registró una radiación global menor al promedio del período (1141.20 J cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>)

4.1.2. Evolución de la humedad relativa.

**Gráfica 2: Evolución de la humedad relativa media diaria en el secadero e intemperie (*E. grandis*).**



En la evolución de la humedad relativa media diaria observada en la Gráfica 2, se puede apreciar que al inicio del proceso las diferencias de humedad relativa entre el secadero y la intemperie no son muy importantes, debido esto quizás, al aporte de vapor de agua por parte de la madera. Los picos de humedad relativa registrados al inicio del proceso coinciden con los días en los que se registraron precipitaciones.

Al final del proceso se observa una leve diferencia de humedad relativa media diaria entre el secadero y la intemperie. Esta diferencia no es muy importante debido a que, como se observó también en la gráfica de temperatura, el acortamiento de los días debido al avance del otoño le quita eficacia al secadero y por lo tanto las diferencias tanto en temperatura como en humedad relativa entre el secadero y la intemperie se hacen menores.

El mayor valor de humedad relativa a la intemperie se dio el 3/3/98 con un 97%, mientras que el menor valor se dio el 11/3/98 con 48%. Por otra parte, en el secadero, el mayor valor se registró el 17/4/98 con un 85.5%, mientras que el menor valor se registró el 4/3/98 con un 42%. La mayor diferencia entre intemperie y secadero fue de 43.5 puntos porcentuales el día 3/3/98 (día de máxima humedad relativa a la intemperie), mientras que el 11/3/98 hubo una diferencia de 10 puntos porcentuales entre el secadero y la intemperie. Los coeficientes de variación para los datos de humedad relativa de secadero e intemperie fueron de 16.3 y 17.5 % respectivamente; es decir que la variación de la humedad relativa fue similar en ambos sitios.

Es importante observar que el mismo día en que se registró la máxima humedad relativa a la intemperie, se registró la mayor diferencia entre intemperie y secadero, esto muestra que dentro del secadero los picos de máxima y mínima humedad registrados a la intemperie se logran atenuar.

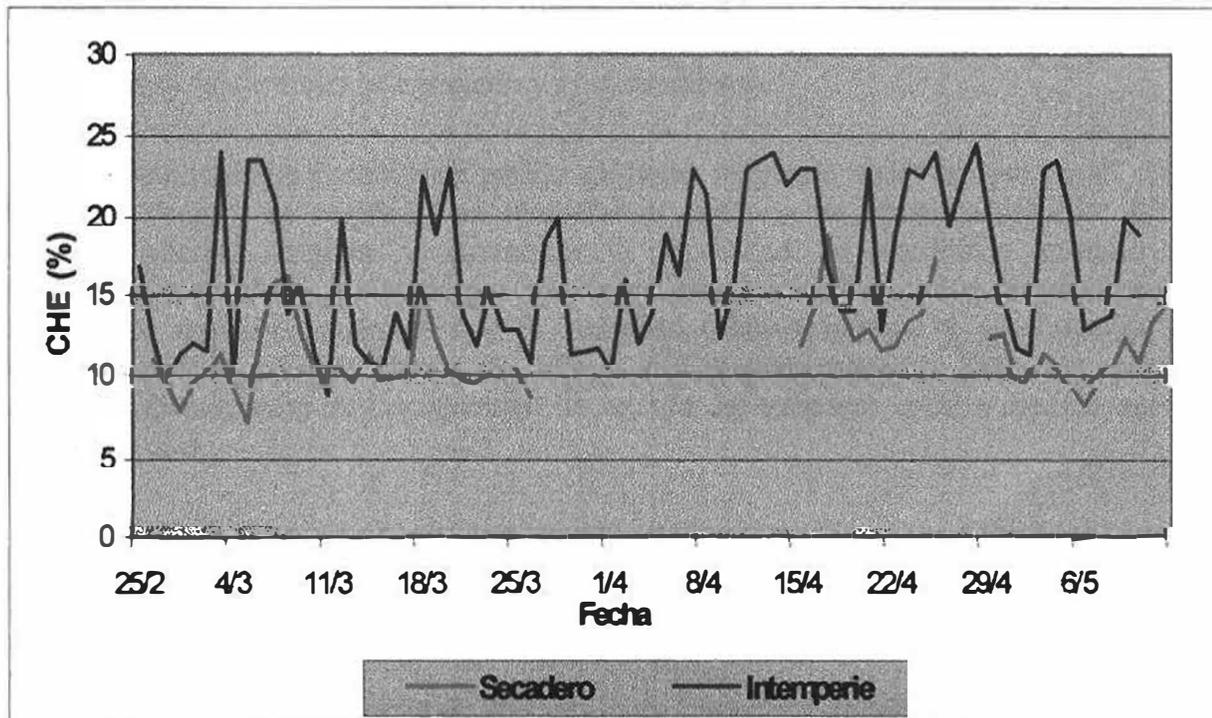
#### 4.1.3. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado.

La humedad de equilibrio higroscópico, fue calculada a partir de las temperaturas y humedades medias diarias a lo largo del periodo de secado, y tuvo una evolución como se observa en la Gráfica 3. Se observa que el contenido de humedad de equilibrio a la intemperie fue mucho más variable a lo largo del proceso que el registrado en el secadero. Por otra parte, el contenido de humedad de equilibrio en el secadero fue casi siempre inferior, siendo esta diferencia más marcada al final del proceso.

Los menores contenidos de humedad de equilibrio medios dentro del secadero se registraron el 28/2 con 8% y el 5/3 con 7%. Por otra parte, el menor contenido de humedad de equilibrio a la intemperie se registró el 11/3 con 9%. Las mayores diferencias en el contenido de humedad de equilibrio se registraron el día 5/3 con 16.2 puntos porcentuales y los días 20/3 y 4/5 ambos con 12.6 puntos porcentuales.

Las mayores diferencias se dieron siempre en días de lluvia o de muy alta humedad relativa a la intemperie.

**Gráfica 3: Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado (*E. grandis*).**



#### 4.1.4. Evolución diaria de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero.

Las condiciones de secado dentro del secadero, varían con las del tiempo y con la humedad de la carga. Ya se vio la variación a lo largo del período total de secado. En las Gráficas 4 y 5 se pueden observar las variaciones que se producen en un período de 24 horas para dos días diferentes en el proceso de secado. La Gráfica 4 corresponde al tercer día de secado (27/2/98), cuando la humedad de la carga y la temperatura externa eran altas. La Gráfica 5 ilustra lo que sucede al final del proceso, en el día 72 de secado (7/5/98), cuando la madera está llegando al contenido de humedad objetivo.

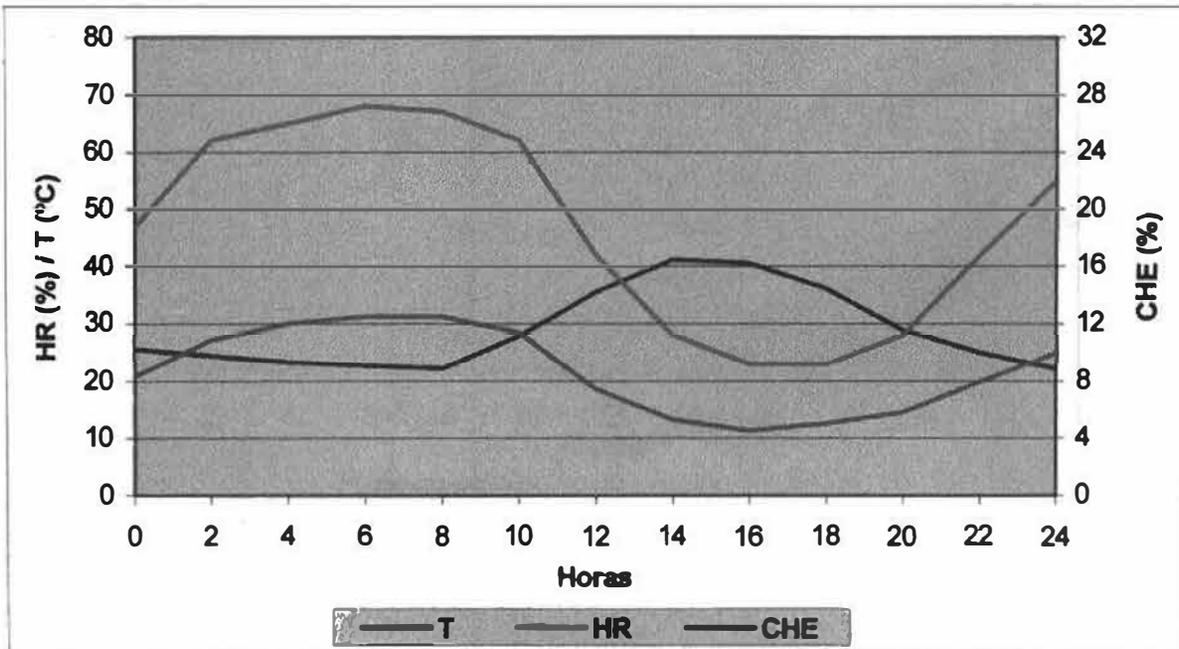
Durante las etapas iniciales del secado, el contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero fluctuó entre el 4.5 y 12.5%. Esta variación entre las horas de mayor

y menor contenido de humedad de equilibrio es la que explica la disminución del gradiente de humedad dentro de las piezas de madera durante la noche, que la bibliografía citada resalta como ventaja del secado solar en la disminución de los defectos de secado (Plumtre, 1979). Las condiciones de secado pueden hacerse aún más suaves cerrando las ventilas en este período, lo cual aumentaría el CHE en caso de secar maderas susceptibles al agrietado y encostramiento.

Comparando datos precisos de ambas gráficas se puede observar que, en el día 3 (fines del verano) se registró una temperatura máxima de aproximadamente 40°C, humedad relativa mínima y contenido de humedad de equilibrio mínimo de aproximadamente 23% y 4% respectivamente. En el día 72 (otoño) la temperatura máxima fue de 30°C, mientras que la humedad relativa mínima y el contenido de humedad relativo mínimo fueron de 30% y 6% respectivamente. Esto nos permite mostrar la disminución de la capacidad de secado del secadero solar a medida que se acortan los días.

Las condiciones de secado más severas se dieron en ésta etapa a las 16:00 horas, y se mantuvieron relativamente constantes entre las 10 y las 19 horas.

**Gráfica 4: Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 3 de secado (*E. grandis*).**

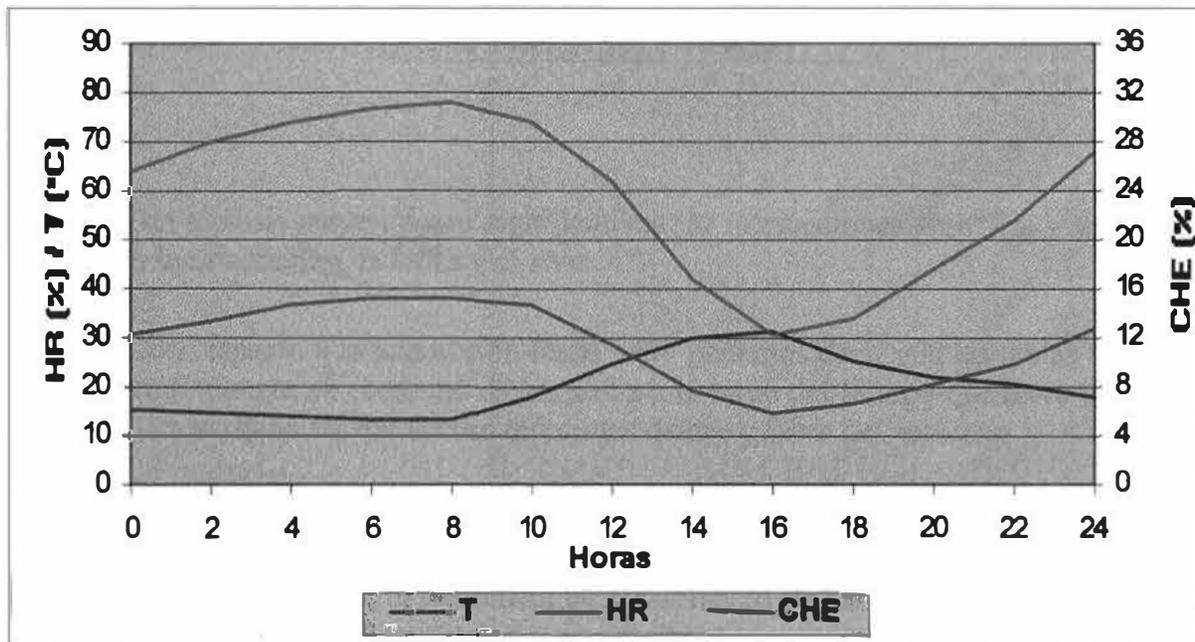


En las etapas finales del proceso, el CHE varió entre 6 y 15.3%. Como se observa en el presente ensayo, el CHE en los primeros días de secado llegó a valores inferiores que en las etapas finales. Esto puede deberse a las mayores temperaturas y menores humedades relativas que se registraron en el secadero y a la intemperie.

Igualmente, los CHE en las etapas finales del proceso llegaban a ser lo suficientemente bajos como para lograr el contenido de humedad final deseado en las tablas y además, siempre fueron inferiores en esta última etapa al CHE a la intemperie.

Las condiciones más severas de secado hacia el final del proceso se produjeron alrededor de las 16 horas, y la duración de los períodos de secado fue entre las 13 y las 19 horas. La repetición diaria de estos ciclos de condiciones severas de secado, explican la humedad final alcanzada en el secadero, ya que en la mayoría de los días en los que se tiene el CHE medio diario en el secadero, este es superior al contenido de humedad logrado por la carga al final del proceso.

**Gráfica 5: Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 72 de secado (*E. grandis*).**



#### 4.1.5. Análisis de las fuentes de variación.

Las fuentes de variación que se consideraron, debido a que podrían afectar el contenido de humedad de las tablas fueron: sitio (intemperie y secadero); orientación norte y sur (ventilador y no ventilador); posición en altura de las tablas en la pila (fila) y fecha. Las interacciones tenidas en cuenta en este ensayo fueron: sitio\*fila, fecha\*sitio, y fecha\*orientación.

**Tabla 2: Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad durante el proceso de secado (*E. grandis*).**

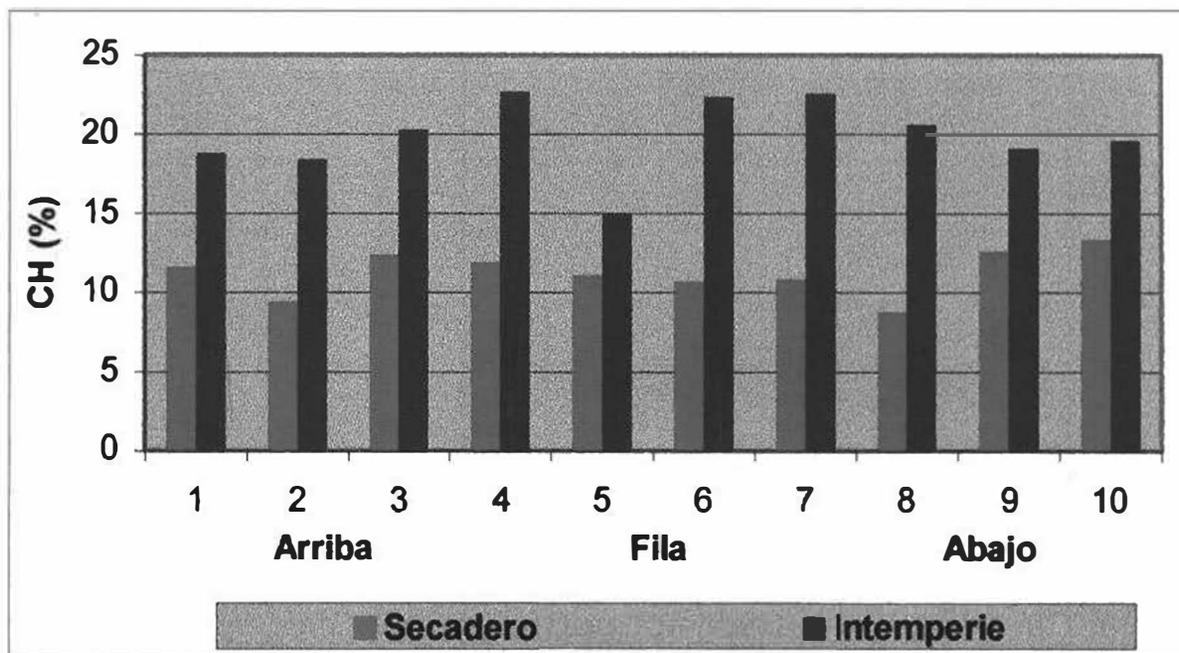
Factor	Significancia
Fila	0.7916
Sitio*fila	0.0853
Sitio	0.0018
Orientación	0.0103
Fecha	0.0001
Fecha*sitio	0.0083
Fecha*orientación	0.9191

Del análisis surgen como significativas las interacciones sitio\*fila y fecha\*sitio, así como la orientación, la fecha y el sitio.

Con respecto a la interacción fecha\*sitio podemos decir que las tablas se secaron de diferente manera en cada uno de los sitios a lo largo del tiempo que llevó el proceso, es decir, las tasas de secado fueron diferentes dentro y fuera del secadero.

Considerando la interacción sitio\*fila, la cual dio significativa, se observa que las diferencias de contenido de humedad entre filas fue diferente según el sitio en donde se encontraran. Por ejemplo, la diferencia en el contenido de humedad final de las filas 5 y 7 fue de 6.15 puntos porcentuales a la intemperie, mientras que en el secadero no existieron diferencias, ambas filas presentaron un CH del 10.71 % (Gráfica 6).

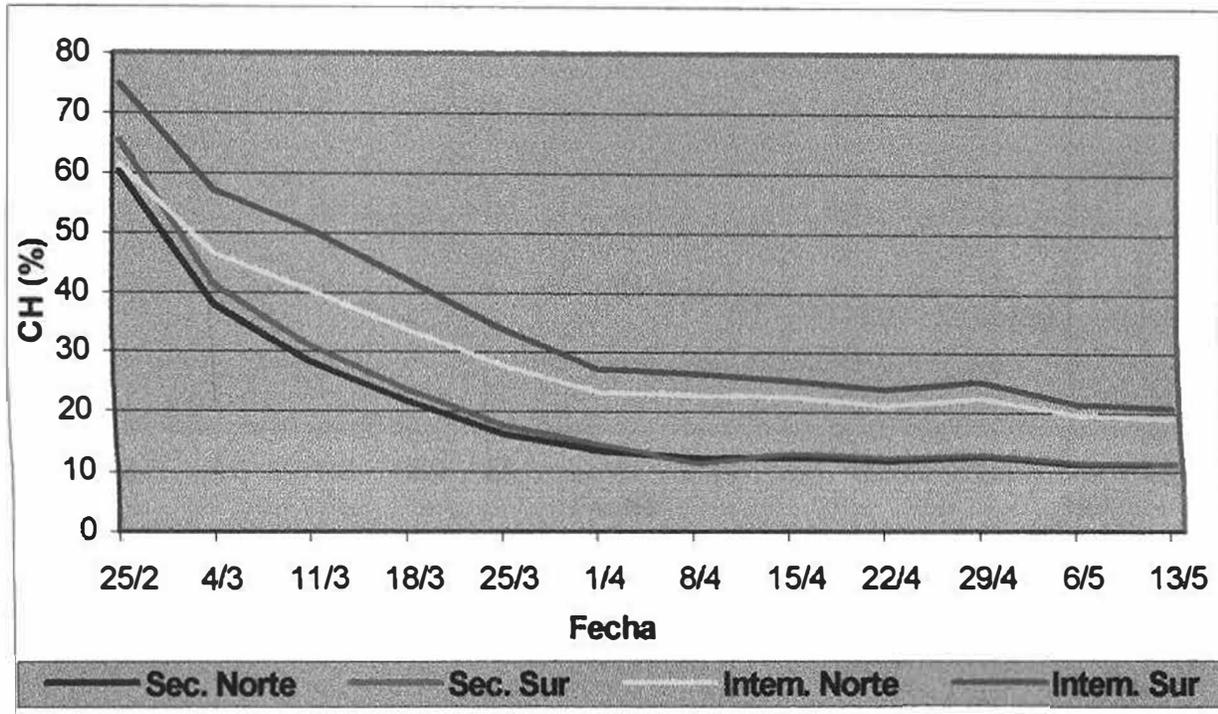
**Gráfica 6: Contenido de humedad final (CH%) de 10 filas para los dos sitios de secado.**



Por otra parte, la interacción fecha\*orientación no resultó significativa. Esto implica, como se puede observar en la Gráfica 7, que aunque haya habido efecto tanto de la fecha como de la orientación, la disminución del contenido de humedad fue similar en las diferentes orientaciones a medida que transcurría el ensayo.

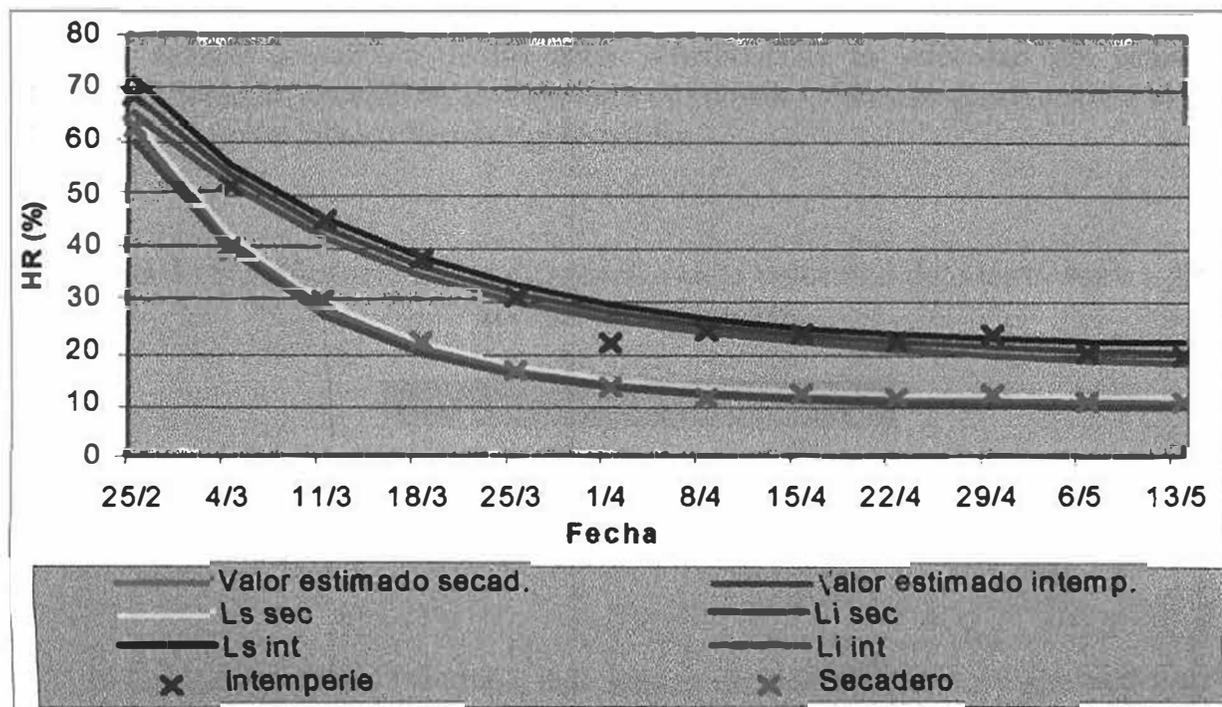
Las tablas también se secaron de manera diferente según su orientación, es decir según estuvieran hacia el norte o el sur. Esto era esperable a la intemperie, debido a la mayor incidencia de los rayos solares en la cara norte de la estiba. Por su parte dentro del secadero, la mayor cercanía a los ventiladores, implica mayor velocidad del viento y viento más seco, provocando las diferencias entre las distintas orientaciones.

**Gráfica 7: Evolución del contenido de humedad (CH) para las diferentes tipos de secado y orientaciones (*E. grandis*).**



En cuanto al sitio, lo que nos dice el dato de la Tabla 2 es que el secado de las tablas fue diferente, según se secan éstas dentro o fuera del secadero. Para demostrar lo anteriormente dicho, se analizó la evolución de la tasa de secado mediante la utilización del modelo no lineal descrito en el punto 3. Los resultados pueden observarse en la Gráfica 8. En dicha gráfica se incluyeron los límites superiores e inferiores de los contenidos de humedad con un intervalo de confianza a 95%. Debido a que en ningún momento las curvas graficadas se interceptan, se demuestra la eficiencia del secado solar con respecto al secado a la intemperie. Teniendo en cuenta las pendientes de las curvas, se puede observar que las tasas de secado fueron distintas para ambos tipos de secado.

**Gráfica 8 : Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas en el secadero y a la intemperie con un intervalo de confianza a 95% (*E. grandis*).**



Con el contenido de humedad final medido a través de xilohigómetro de todas las tablas, se analizó la diferencia de humedad entre cada sector de las tablas y entre las tablas. De los resultados del análisis se concluyó que hay diferencias significativas en la humedad tanto entre tablas como dentro de tablas (entre los extremos y el medio) como se aprecia a continuación en la Tabla 3.

**Tabla 3: Significancia de las diferencias de contenido de humedad dentro y entre tablas (*E. grandis*).**

Factor	Significancia
Dif. Dentro de tablas	0.0001
Dif. Entre tablas	0.0001

Las diferencias entre las tablas pueden explicarse por la diferente orientación y por la altura en que se encontraban.

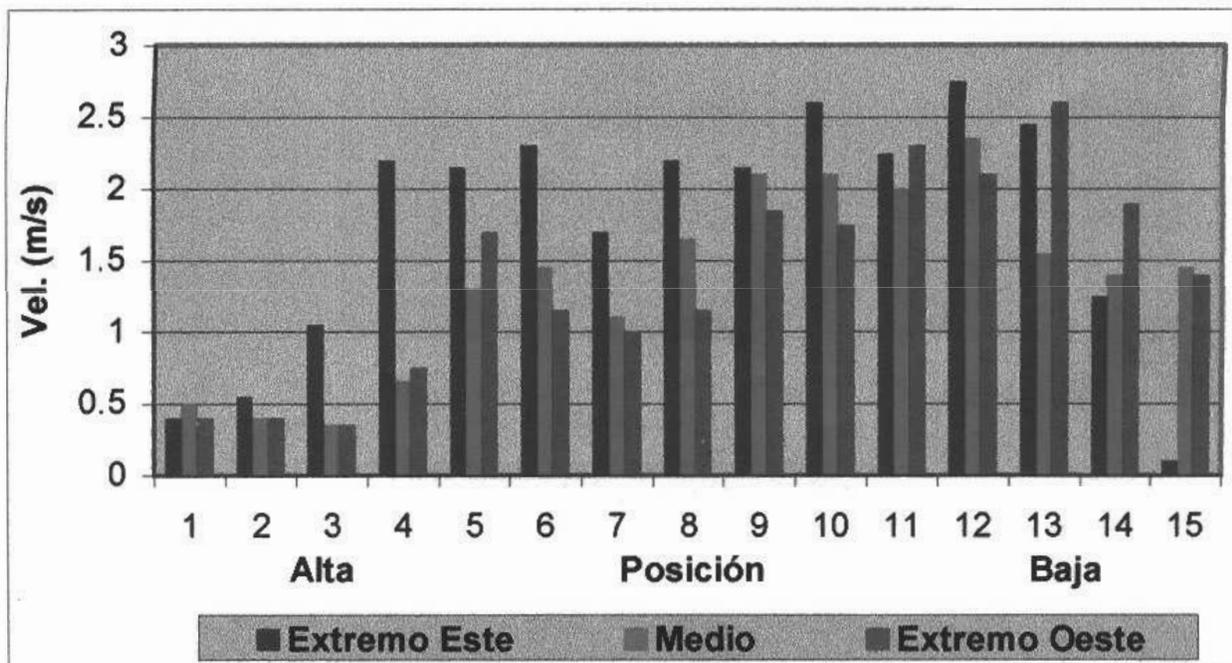
Del análisis estadístico de los datos obtenidos de la velocidad del viento, se determinó, tanto la posición en altura (altura de camada), como la distribución a lo largo de la pila (Posición lateral) fueron significativas.

**Tabla 4 : Significancia de las diferencias en la velocidad del viento dentro del secadero (*E. grandis*).**

Factor	Significancia
Altura de camada	0.0001
Posición lateral	0.0370

Las diferencias en velocidad del viento a distintas posiciones y alturas dentro del secadero, pueden visualizarse en la Gráfica 9.

**Gráfica 9: Velocidad del viento en las distintas posiciones en altura y lateralmente en la pila del secadero (*E. grandis*).**

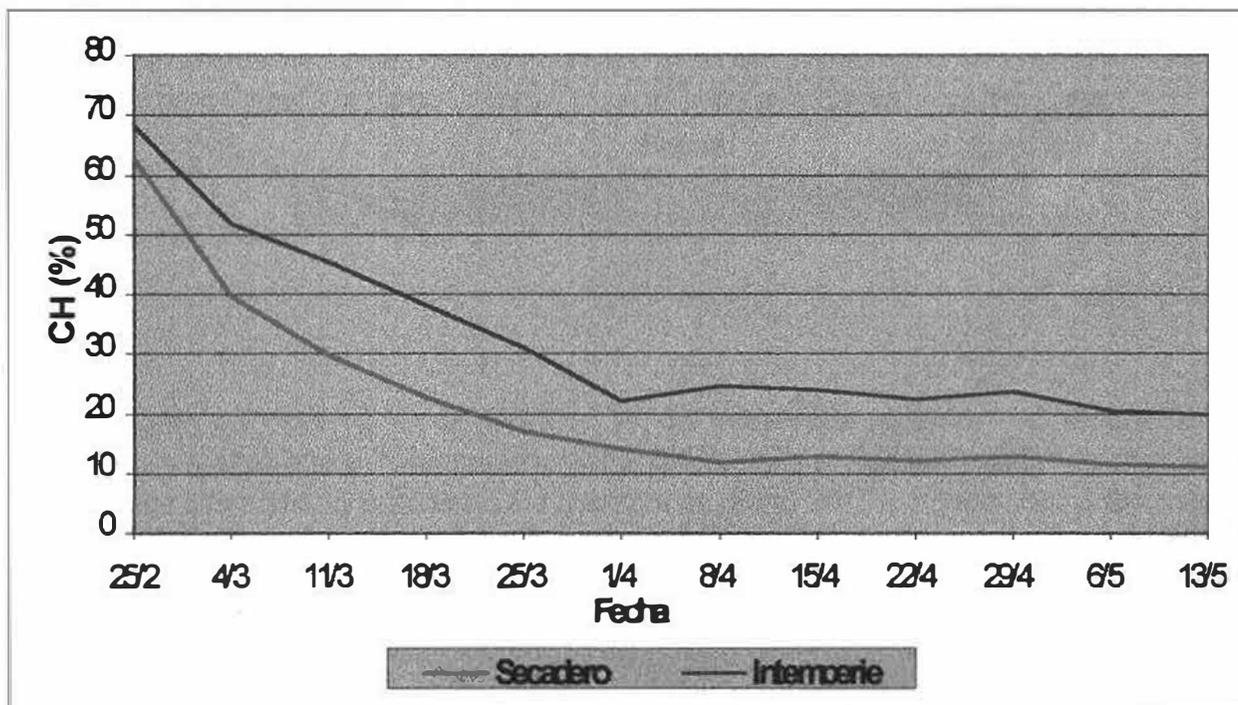


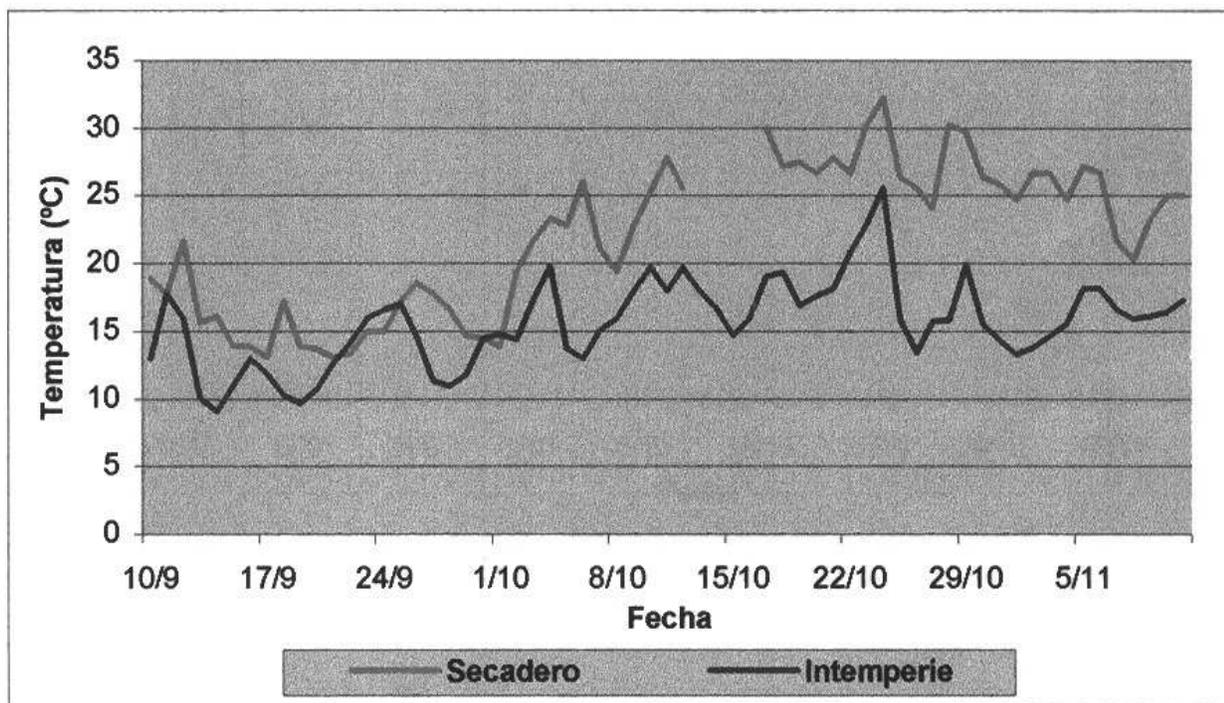
#### 4.1.6. Comparación de las curvas de secado.

Como lo indican las curvas de secado a la intemperie y en el secadero (Gráfica 10), este último logra una menor humedad final y un secado más rápido. La humedad final registrada en el secadero fue de 11.3%, mientras que la registrada a la intemperie fue de 19.9%.

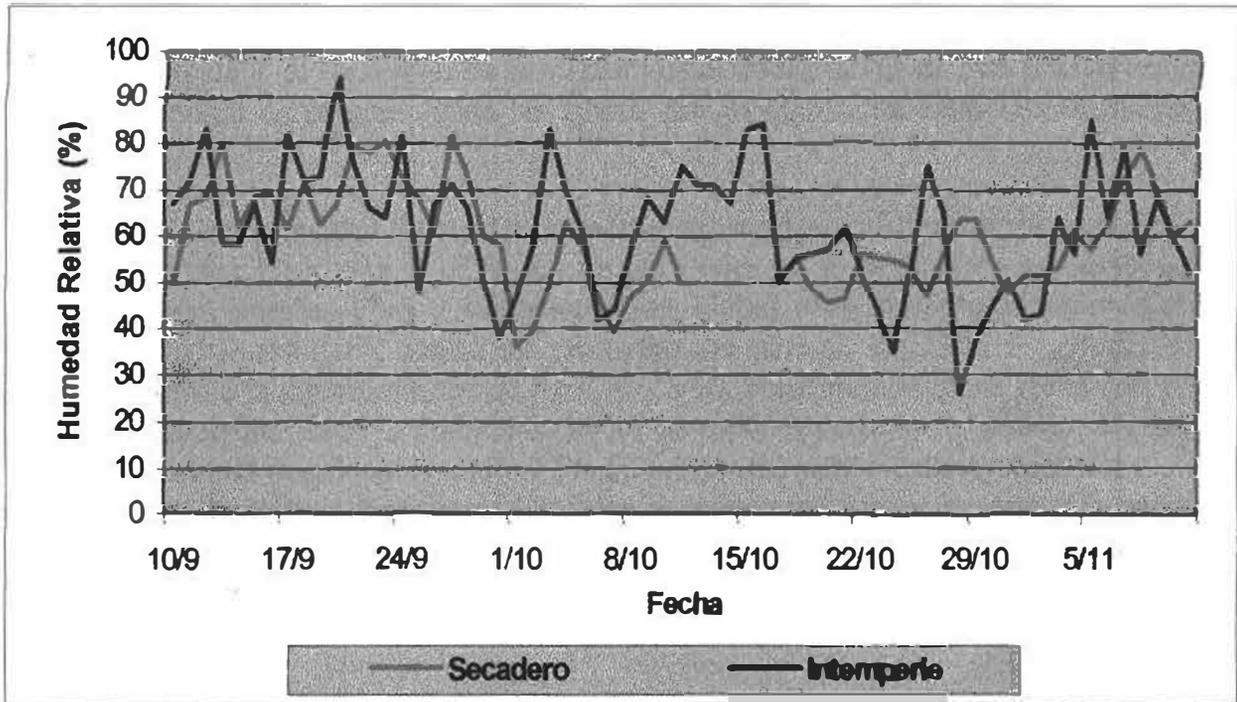
Las precipitaciones tienen una mayor influencia sobre la humedad de la madera a la intemperie. Esto se ve claramente en el dato de contenido de humedad de la madera registrada el 8/4/98. En dicha fecha el contenido de humedad de las tablas secadas al aire aumentó con respecto a la medida anterior, y esto se debe a la ocurrencia de una precipitación de 7.7 milímetros el 6/4/98 y a una de 5.6 milímetros el 7/4/98. Por su parte, en la medida realizada del contenido de humedad de las tablas del secadero del 8/4/98 no se registró un aumento con respecto al 1/4/98, sino que el contenido de humedad siguió disminuyendo. Algo similar ocurrió en la medida registrada el 29/4/98.

**Gráfica 10: Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas del secadero y a la intemperie (*E. grandis*).**



4.2. ENSAYO DE *Eucalyptus tereticornis*.4.2.1. Evolución de la temperatura.**Gráfica 11: Evolución de la temperatura media diaria en el secadero y a la intemperie (*E.tereticornis*).**

Como se observa en la Gráfica 11, la temperatura dentro del secadero casi siempre fue mayor que a la intemperie, y las diferencias se hicieron cada vez mayores a medida que avanzaba la primavera (la máxima se dio el 28/10, siendo esta diferencia de 14,48 °C.). Estas diferencias entre la temperatura media diaria en el secadero y a la intemperie pueden deberse al aumento de las temperaturas y de las horas de radiación solar, aumentando la capacidad de secado del secadero.

4.2.2. Evolución de la humedad relativa.**Gráfica 12: Evolución de la humedad relativa media diaria en el secadero y a la intemperie (*E.tereticornis*).**

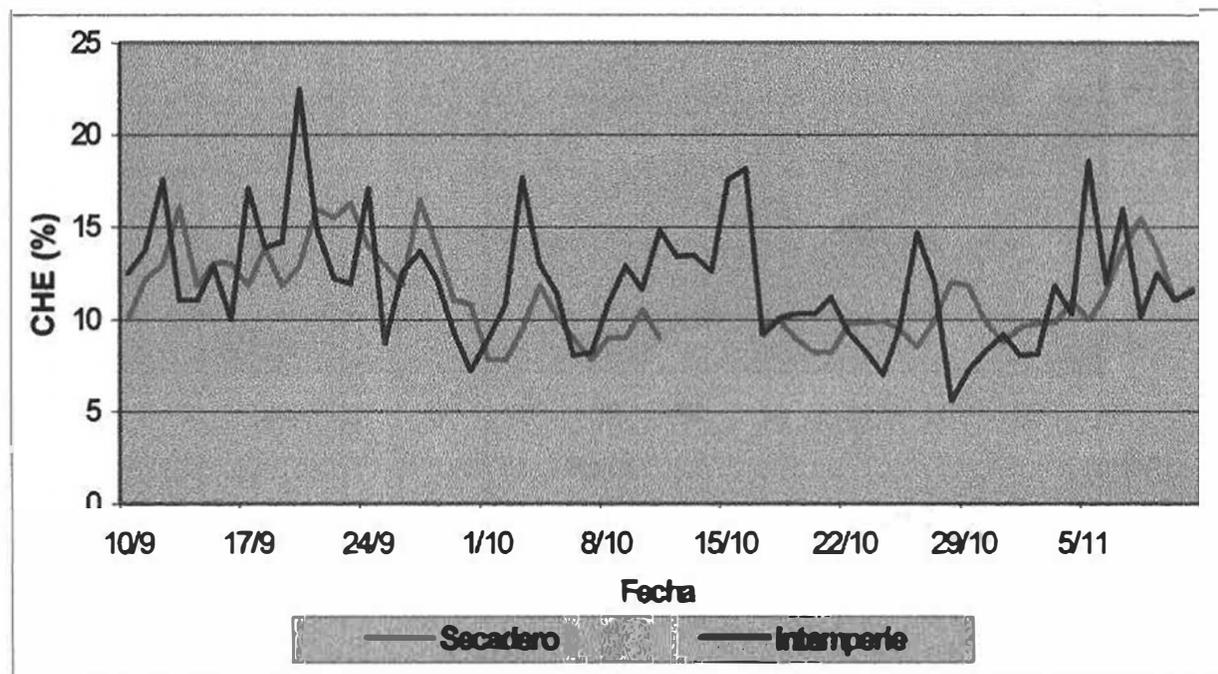
En los primeros días del secado se registró una humedad relativa dentro del secadero menor a la esperada según Mantero et al., 1996. Esto se debe al bajo contenido de humedad inicial de las tablas (cerca del PSF), por lo que el aporte de vapor de agua por parte de la madera no es tan importante como lo sería si ésta estuviera verde. Por otra parte, la humedad relativa ambiental en los primeros días del ensayo tampoco fue muy elevada. Se puede observar también que durante todo el proceso la humedad relativa a la intemperie es más variable que en el secadero, siendo el coeficiente de variación de 23.1 y 18.5% respectivamente (Gráfica 12).

4.2.3. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado.

La humedad de equilibrio higroscópico, calculada a partir de las temperaturas y humedades relativas medias diarias a lo largo del período de secado, tuvo la evolución que se observa en la Gráfica 13. Durante las primeras etapas del secado, los contenidos de humedad de equilibrio dentro del secadero pueden ser mayores que los externos debido a la evaporación del agua libre de las tablas (Mantero *et al.*, 1996), pero como se dijo anteriormente, el contenido de humedad inicial de las tablas de este ensayo era muy cercano al punto de saturación de las fibras, por lo que dicha evaporación inicial no ocurrió.

La menor humedad de equilibrio media registrada en el interior del secadero fue de 7.8% los días 1/10, 2/10 y 7/10, días en los cuales no se registraron precipitaciones, se dieron temperaturas altas y radiación solar global muy superior al promedio del período ( $2535 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ; contra un promedio del período de  $1796 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). El menor registro a la intemperie fue de 5.6% el 28/10, coincidiendo dicha fecha con el día de menor humedad relativa ambiente (26%) de todo el período de secado. La mayor diferencia entre el exterior y el interior fue de 9.6 puntos porcentuales, registrada el 20/9, día en el que llovieron 4 milímetros (también se registraron lluvias los tres días previos). Aquí se puede observar otra de las ventajas del uso del secadero, ya que en días de lluvia el CHE dentro del secadero se mantiene marcadamente inferior que a la intemperie.

**Gráfica 13: Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado (*E.tereticornis*).**

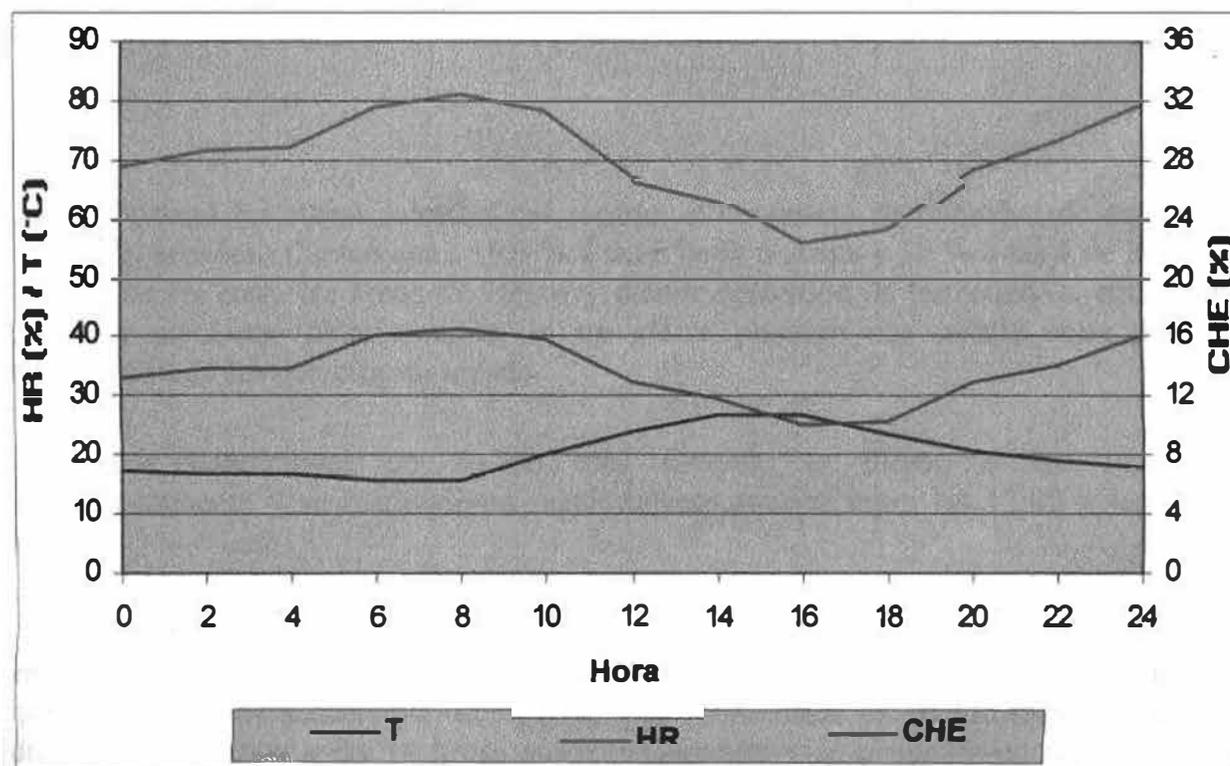


4.2.4. Evolución diaria del contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero.

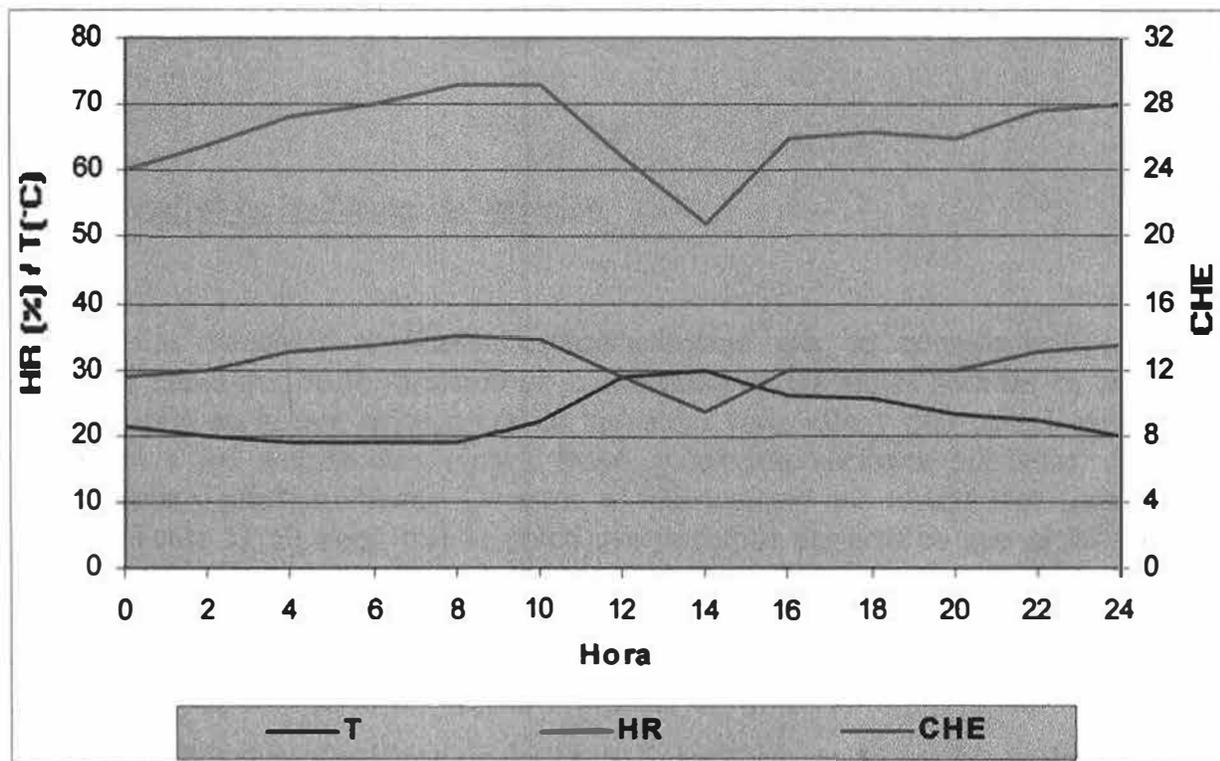
Luego del análisis del contenido de humedad de equilibrio a lo largo de todo el período de secado, se analizó la evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en dos días diferentes.

Las condiciones de secado dentro del secadero varían con las condiciones atmosféricas y con la humedad de la carga. Ya se vio la variación a lo largo de todo el período de secado. En las Gráficas 14 y 15, se pueden observar las variaciones que se producen en un período de 24 horas para dos días diferentes del proceso de secado. La Gráfica 14, corresponde al tercer día de secado (12/9/98), cuando la humedad de la carga, por más que estaba por debajo del punto de saturación de las fibras, era más fácilmente extraíble que al final del proceso. La Gráfica 15 ilustra lo que sucede al final del proceso, en el día 57 (4/11/98), cuando la madera estaba llegando al contenido de humedad objetivo.

**Gráfica 14: Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 3 de secado (*E. tereticornis*).**



**Gráfica 15: Evolución diaria de contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 57 de secado (*E.tereticornis*).**



Durante las etapas iniciales del secado, el contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero fluctuó entre 16.5 % a las 8 de la mañana y 10 % a las 4 de la tarde. Esta variación entre las horas de mayor y menor contenido de humedad de equilibrio, como se mencionó anteriormente, es un efecto positivo del secado solar para la disminución de los defectos de secado.

Las condiciones de secado más severas, se dieron a las 16 horas aproximadamente y se mantuvieron relativamente severas entre las 12:00 y las 18:00 horas.

En las etapas finales del proceso, el contenido de humedad de equilibrio varió entre 9.5 % y 14 %, siendo en promedio para el día 57 de secado de 12.4 %, mientras que en el día 3 de secado fue de 13.6 %. Las condiciones de secado más severas, se dieron en esta etapa a las 14 horas aproximadamente y se mantuvieron relativamente constantes entre las 11:00 y las 20:00 horas.

En 31 de los 63 días de secado el contenido de humedad de equilibrio medio diario fue inferior al contenido de humedad final alcanzado (11.48 %), lo que indica que fácilmente se pueden alcanzar contenidos de humedad de las tablas del orden del 12% dentro del secadero en primavera.

#### 4.2.5. Análisis de las fuentes de variación.

Las variables analizadas estadísticamente que se consideraron potenciales factores causantes de la variación en la humedad de las tablas secadas en este ensayo fueron: pila en la que se encontraban las tablas (pila este y pila oeste), posición con respecto a los ventiladores (sitio), fecha, y las interacciones pila\*sitio, pila\*fecha, sitio\*fecha y pila\*sitio\*fecha. De estos, el único efecto que resultó significativo fue la fecha (Tabla 5). Es decir que lo único que podemos destacar es que el secado de las tablas fue similar en cualquiera de las situaciones consideradas

**Tabla 5: Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad durante el proceso de secado (*E. tereticornis*).**

Factor	Significancia
Pila	0.2751
Sitio	0.8960
Pila*sitio	0.3651
Fecha	0.0001
Pila*fecha	0.8305
Sitio*fecha	0.6640
Pila*sitio*fecha	0.7426

Para poder conocer si la variación de la humedad final lograda entre las tablas en cada pila era significativa, se procedió a analizar estadísticamente los datos obtenidos con el xilohigrómetro. La variación de la humedad final podría estar determinada por los siguientes factores: pila en la que se encontraban las tablas (este u oeste), altura en la pila (camadas 3,8 y14 en el plano vertical); posición de la tabla en cada camada (tablas

números 3, 12 y 23 en el plano horizontal). También se consideró el efecto de las interacciones pila\*altura, pila\*tabla, altura\*tabla y pila\*altura\*tabla.

De todos los factores analizados, la única que resultó significativa fue la altura en la que se encontraban las tablas dentro de la pila (Tabla 6). Esta diferencia puede deberse a la variación de la velocidad del viento en las distintas posiciones en altura en la pila (Gráfica 16). Esto podría solucionarse instalando estratégicamente algún tipo de deflector para homogeneizar la distribución del viento que atraviesa la pila.

**Tabla 6: Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en el contenido de humedad final de las tablas (*E.tereticornis*).**

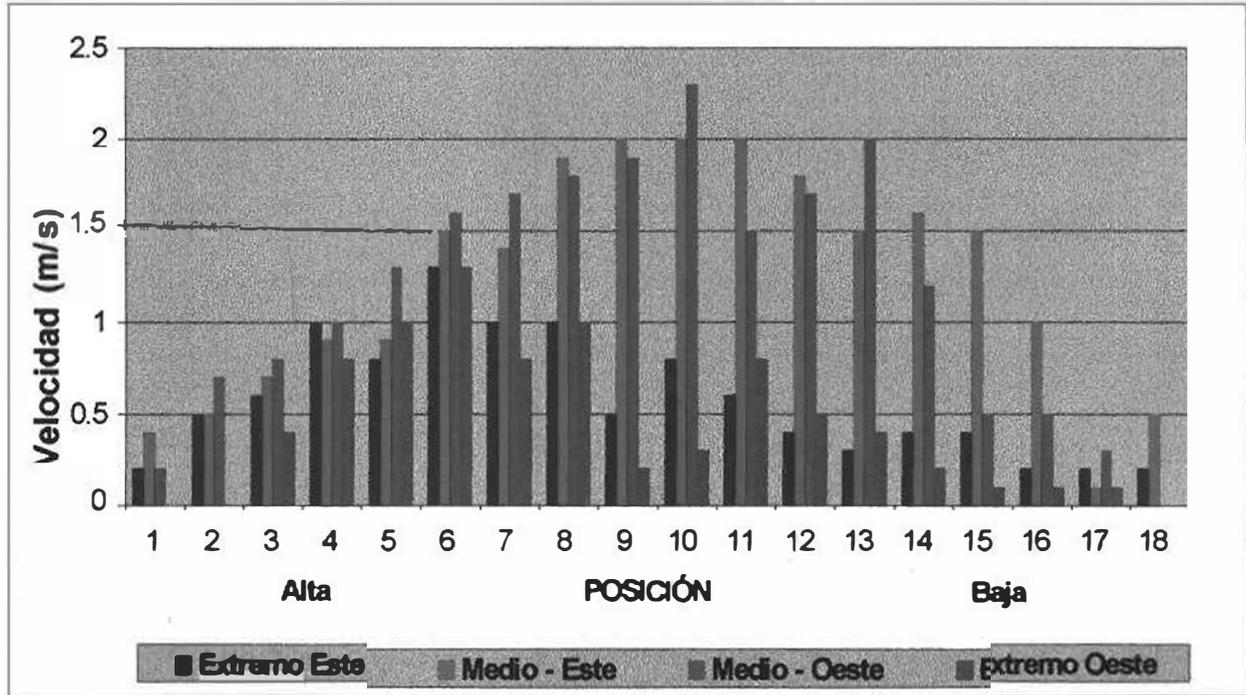
Factor	Significancia
Pila	0.6198
Altura	0.0544
Pila*altura	0.1924
Tabla	0.1049
Pila*tabla	0.7448
Altura*tabla	0.4867
Pila*altura*tabla	0.2521

Del análisis estadístico de los datos de velocidad del viento obtenidos en el ensayo, se determinó que tanto posición en altura como distribución a lo largo de la pila son significativos (Tabla 7). Esto podría ser corregido, como se mencionó anteriormente, con la instalación de deflectores.

**Tabla 7: Significancia de las diferencias en la velocidad del viento dentro del secadero (*E.tereticornis*).**

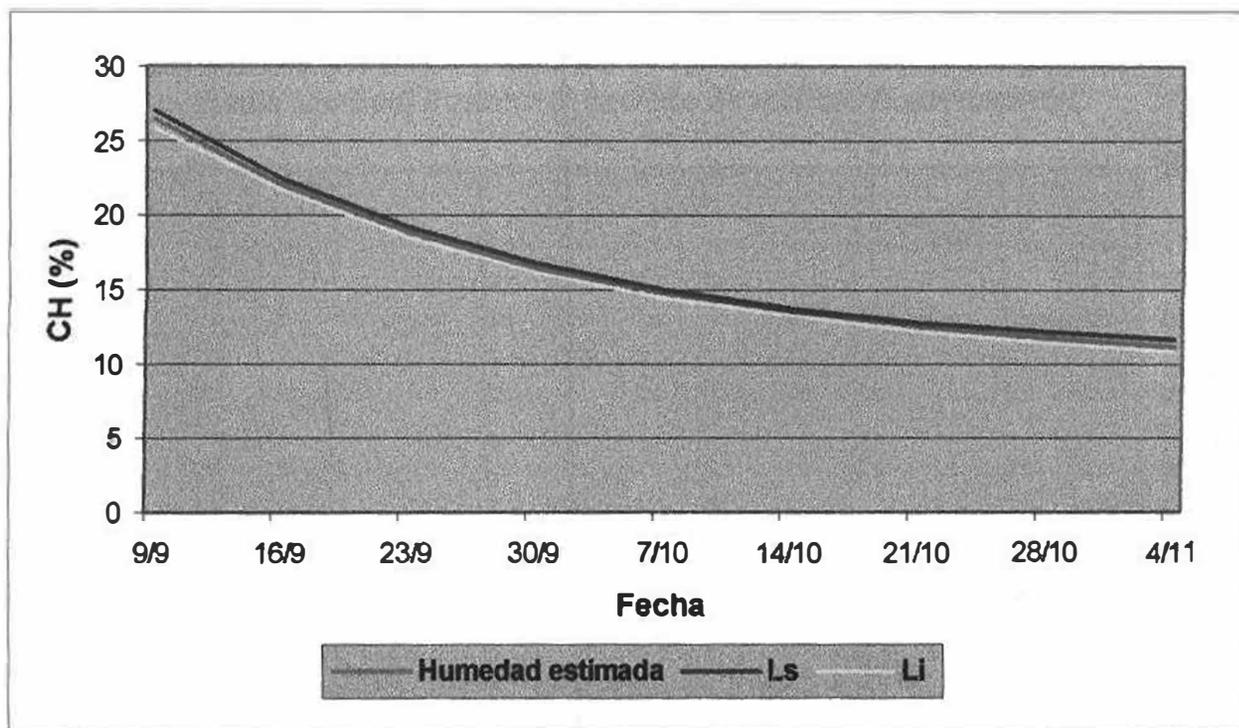
Parámetro	Significancia
Altura de camada	0.0001
Posición lateral	0.0001

**Gráfica 16: Velocidad del viento en las distintas posiciones de la pila (*E.tereticornis*).**



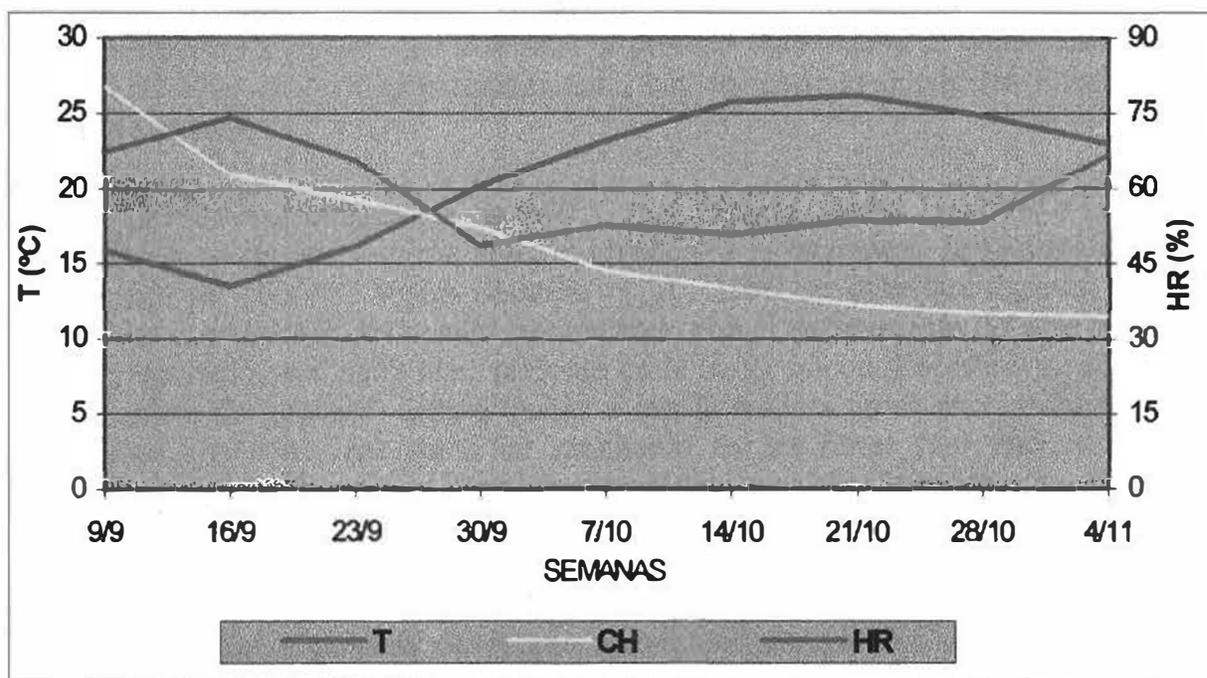
En la Gráfica 17 se observa la evolución del contenido de humedad de las tablas, estimado por el modelo lineal descrito en el punto 3.

**Gráfica 17: Evolución del contenido de humedad (CH) de las tablas en el secadero con un intervalo de confianza a 95% (*E.tereticornis*).**



4.2.6. Análisis de la curva de secado.

**Gráfica 18: Temperatura, contenido de humedad de tablas y humedad relativa media semanal durante el período de secado (*E.tereticornis*).**



Como se puede observar en la Gráfica 18, el contenido de humedad de las tablas tiene un marcado descenso en la primera semana del proceso. Por más que el contenido de humedad inicial de las tablas estaba por debajo del punto de saturación de las fibras, dicha humedad está menos retenida en este momento que al final del período de secado, lo que provoca dicho descenso.

Si bien las tasas de secado van disminuyendo paulatinamente a medida que avanza el proceso de secado, la velocidad de secado disminuyó en la segunda semana del proceso, comparada esta con las tasas de secado de la primera y la cuarta semana. La disminución de la tasa de secado de la segunda semana se debió a la disminución de la temperatura media semanal y a la elevada humedad relativa. También pudo estar afectada por el corte de energía eléctrica que duró aproximadamente dos semanas, en las cuales no funcionaron los ventiladores del secadero.

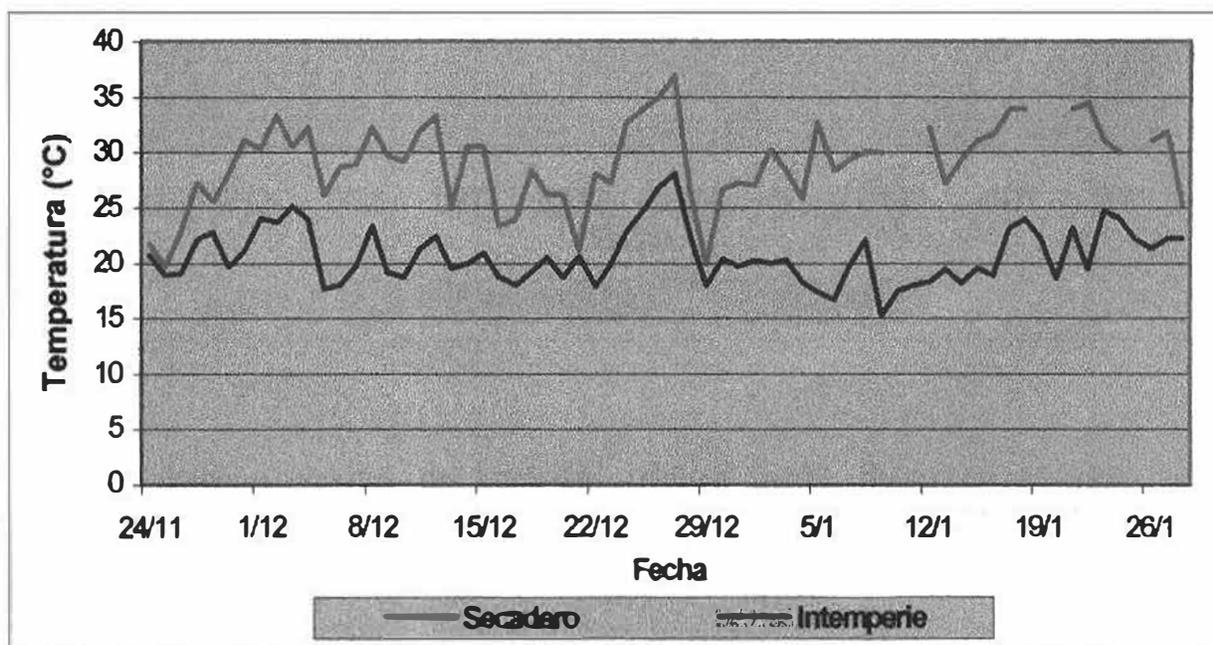
### 4.3. ENSAYO DE *Pinus elliotti*.

#### 4.3.1. Evolución de la temperatura.

Observando la Gráfica 19 se ve que la temperatura dentro del secadero fue siempre mayor que a la intemperie, no notándose claramente que las diferencias se hicieran mayores a medida que avanzaba el proceso. Igualmente se puede observar que entre el 31/12 y el 24/1 aproximadamente, hay un período donde las diferencias se hicieron mayores.

La menor diferencia fue de 0.46 °C registrándose el día 21/12/98, y la máxima diferencia de temperatura media entre el secadero y la intemperie se registró el 5/1/99, siendo esta de 15,4 °C. Según Mantero *et al.*, 1996 se deberían registrar menores diferencias al comienzo del secado coincidiendo con el enfriamiento del aire provocado por la evaporación del agua libre presente en la carga inicial. En este caso se observó bien al inicio del proceso, debido quizás a que la madera no se encontraba en estado verde sino que cerca del punto de saturación de las fibras (por encima de este). Igualmente se debe tener en cuenta que a medida que se seca la madera, la energía con que es retenida la humedad aumenta, por lo que al inicio del proceso la humedad está relativamente poco retenida. El hecho de que la madera se encontraba cerca del punto de saturación de las fibras en el momento de iniciare el proceso de secado, se considera una ventaja para que el proceso de secado resulte ser siempre más eficiente dentro del secadero que a la intemperie.

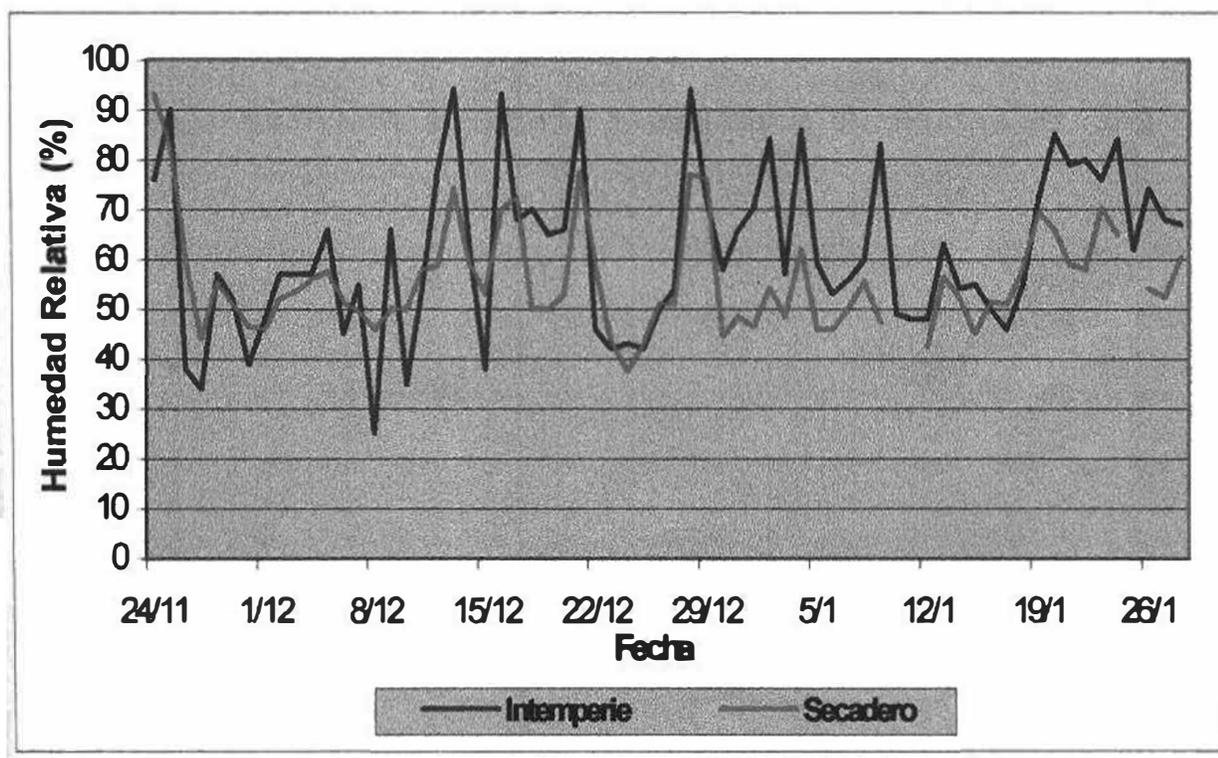
**Gráfica 19: Evolución de la temperatura media diaria en el secadero y a la intemperie (*P. elliotti*).**



#### 4.3.2. Evolución de la humedad relativa.

Como se observa en la Gráfica 20, en los primeros días de secado se registró una humedad relativa dentro del secadero bastante elevada, que luego disminuyó rápidamente. Estos valores de humedad relativa en el secadero, pudieron estar determinados por la humedad relativa que se registró a la intemperie (que tuvo un comportamiento similar), y también a que la humedad dentro de las tablas en este momento era alta (aprox. 40 %), por lo que el vapor de agua liberado por las tablas, provocó el pico inicial de HR que se observa en la gráfica 20. Se puede observar también que durante todo el proceso la humedad relativa a la intemperie es más variable que en el secadero. A partir del 29/12, la humedad relativa a la intemperie es casi siempre superior a la del secadero.

**Gráfica 20: Evolución de la humedad relativa media diaria en secadero e intemperie (*P. elliotti*).**



Los mayores valores de humedad relativa media diaria en secadero, se registraron los días 24/11, 21/12 y 28/12 con 90%, 77.5% y 77% respectivamente. Todos estos picos máximos de humedad relativa media diaria dentro del secadero, ocurrieron

cuando hubo precipitaciones, por ejemplo, el día 28/12 llovieron 77 mm. Algo muy similar, ocurre con los picos máximos de HR a la intemperie, siendo estos picos, superiores a los registrados en el secadero.

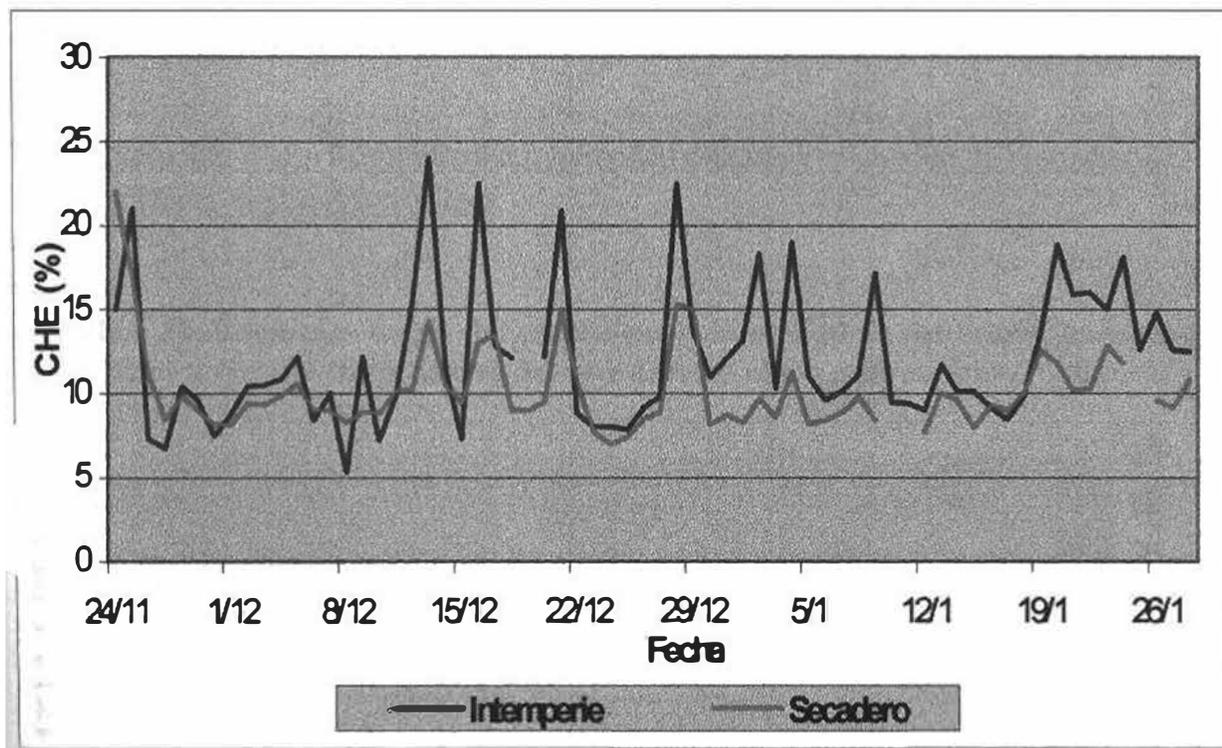
Con respecto a los valores mínimos de humedad relativa media diaria registrados en el presente ensayo, se observa que hasta el 18/12/98 aproximadamente, los valores mínimos de HR se registraron a la intemperie, registrándose por ejemplo el 8/12/98, un valor de 25%. A partir de esta fecha, los menores valores de HR se registraron dentro de secadero. Contrariamente a lo que ocurre con los valores máximos, los valores mínimos están asociados a períodos de pocas lluvias. La excepción a lo anteriormente dicho, se da el 8/12/98, ya que en esta fecha llovieron 1.3 mm. y el valor de HR es muy bajo. Esto se puede explicar observando que los días anteriores al 8/12/98 no se registraron lluvias, las temperaturas fueron altas y quizás dicha lluvia de 1.3 mm se registró tarde en la noche, afectando a la humedad relativa del siguiente día.

Las mayores diferencias de humedad relativa media diaria entre la intemperie y el secadero, se registraron los días 2/1/99 y 9/1/99 con 30 y 35.5 puntos porcentuales respectivamente, siendo el coeficiente de variación de 19.4% en el secadero y de 26.5% a la intemperie. Dichos registros también están asociados a ocurrencias de precipitaciones. Esto vuelve a confirmar la importancia del secadero en los días de lluvia.

#### 4.3.3. Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado.

A partir de las temperaturas y humedades medias diarias a lo largo del período de secado, se calculó la humedad de equilibrio higroscópico (Gráfica 21).

**Gráfica 21: Evolución del contenido de humedad de equilibrio en el período de secado (*P. elliotti*).**



La evolución del contenido de humedad de equilibrio es muy similar al observado en la gráfica de humedad relativa media diaria (Gráfica 21), pero siendo los valores de CHE sensiblemente menores que los de HR.

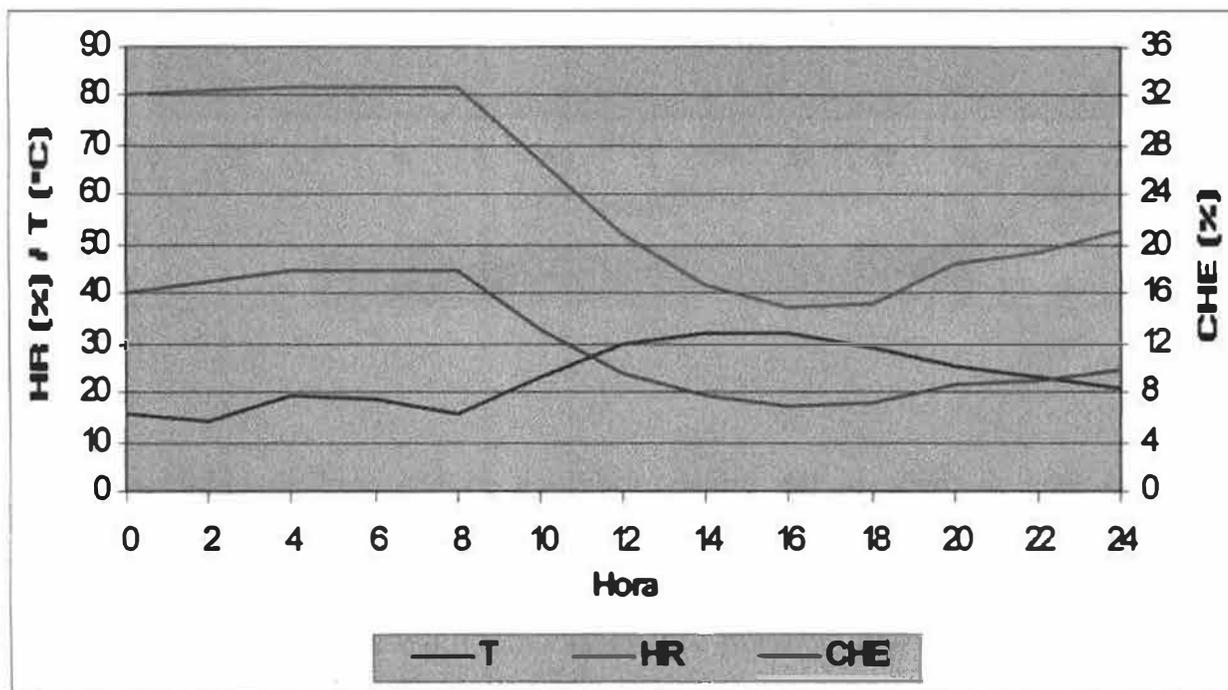
La menor humedad de equilibrio registrada dentro del secadero fue de 7% el día 24 de diciembre (ese mismo día el CHE a la intemperie fue de 8%), día en el cual se registró una radiación solar global de  $3331 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ , siendo el promedio para este periodo de  $2157 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$ . El menor valor a la intemperie se registró el día 8 de diciembre con un contenido de humedad de 5,3%, coincidiendo con un día donde se registraron altas temperaturas. La mayor diferencia entre el CHE dentro y fuera del

secadero fue de 9.7 puntos porcentuales y se registró el 13 de diciembre. Se pudo comprobar que las mayores diferencias entre los contenidos de humedad de equilibrio dentro y fuera del secadero se dieron en días de lluvia o de muy alta humedad relativa.

Una importante observación que se puede realizar en la Gráfica 21 es que en el último período del proceso de secado, por ejemplo a partir del 30/12/98 y hasta el 28/1/99 (fecha de finalizado el ensayo), el promedio del CHE medio diario dentro del secadero fue de 9.7%, mientras que a la intemperie fue de 12.7%. Esta diferencia en CHE puede resultar importante para lograr los contenidos de humedad finales de la madera deseados.

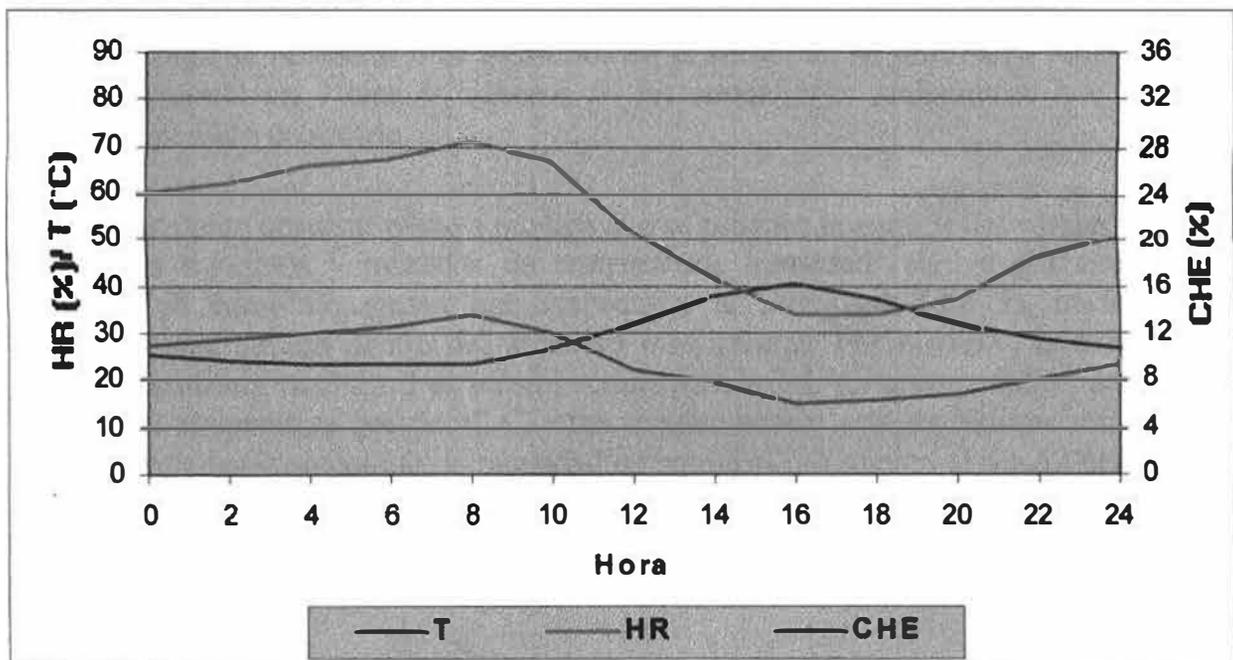
4.3.4. Evolución diaria de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero.

**Gráfica 22: Evolución diaria del contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 3 de secado (*P. elliotti*).**



En las Gráficas 22 y 23 se puede observar las variaciones que se producen en un período de 24 horas durante los días 3 (26/11/98) y 62 (24/1/99) del período de secado. Ambas ilustran las variaciones que se dan a lo largo del día en dos condiciones muy diferentes dentro del período de secado; la primera representa la variación en HR, T y CHE en las primeras etapas del secado, mientras que la última ilustra lo que sucede al final del proceso, cuando la madera está llegando al contenido de humedad objetivo.

**Gráfico 23: Evolución diaria del contenido de humedad de equilibrio, humedad relativa y temperatura dentro del secadero en el día 62 de secado (*P. elliotti*).**



El contenido de humedad de equilibrio dentro del secadero durante las etapas iniciales del secado fluctuó entre 17,9 y 6,8 %. Las condiciones de secado más severas, en el día 3 de secado, se dieron a las 15 horas y se mantuvieron relativamente severas entre las 11 y las 20 horas. Es importante observar la temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio máximas y mínimas que se alcanzaron en este período, para compararla con el día 62 de secado y asimismo con las otras gráficas de evolución diaria de los otros ensayos.

En las etapas finales del proceso, el contenido de humedad de equilibrio varió entre 13,5 y 6,2%. El rango de variación no es tanto menor que en las etapas iniciales de secado, pero igualmente se puede observar que solamente desde las 5 a las 10 de la

mañana el contenido de humedad de equilibrio superó el contenido de humedad final deseado en las tablas, o sea el 12%. Si se observa la gráfica del día 3, el contenido de humedad de equilibrio, superó el contenido de humedad final deseado en las tablas desde las 0 a las 10 horas.

Las condiciones más severas de secado se produjeron alrededor de las 16:00 horas y la duración de estos períodos de secado intenso se dio entre las 11 y las 21 horas.

De los 66 días que duró el proceso de secado, en 53 días el contenido de humedad de equilibrio medio diario, fue inferior al 12% de contenido de humedad final deseada en las tablas. Esto, sumado a la repetición diaria de los ciclos de condiciones severas de secado, explica la humedad final alcanzada en el secadero, en un tiempo relativamente corto y teniendo en cuenta lo adverso de las condiciones ambientales que reinaron durante el período de secado.

Es importante observar cómo a medida que se produce la entrada del verano (día 62), los valores máximos y mínimos de temperatura, humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio varían con respecto a la primavera (día 3), haciendo las condiciones de secado dentro del secadero más severas. Por ejemplo, la temperatura máxima alcanzada en el día 3 es sensiblemente menor (32 °C) que en el día 62 en el que la máxima temperatura fue de 40 C. Algo similar ocurre con los valores mínimos de humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio ya que en el día 62 del proceso estos fueron menores que en el día 3.

#### 4.3.5. Análisis de las fuentes de variación.

Las fuentes de variación analizadas en este ensayo buscaban evaluar el efecto del tipo de secado en las condiciones intrínsecas de la madera (humedad final externa e interna y tensiones de secado), efecto de posición en la pila y orientación de las tablas (norte o sur), así como también el efecto del viento, la fecha del proceso y sus interacciones.

##### 4.3.5.1. Efecto de la Fecha y sus interacciones.

El contenido de humedad de las tablas no presentó diferencias significativas entre tratamientos para ninguna de las variables analizadas, excepto para el caso de la fecha. Es decir que se encontró que había diferencias significativas en la humedad de las tablas en distintas fechas tanto dentro como fuera del secadero. En base a esto, se analizó con mayor profundidad el efecto fecha. Los datos pueden apreciarse en las siguientes tablas.

**Tabla 8: Efecto del factor fecha en cada tipo de secado (*P. elliotti*).**

Factor	Tipo de secado	Nivel de significancia
Fecha	Intemperie	0.0001
Fecha	Secadero	0.0010

**Tabla 9: Significancia de la diferencia del contenido de humedad de las tablas entre el secadero y la intemperie para distintas fechas (*P. elliotti*).**

Fecha	Nivel de significancia
5/1/99	0.9544
12/1/99	0.7786
26/1/99	0.0374
28/1/99	0.1597
1/12/98	0.0920
8/12/98	0.2563
15/12/98	0.7596
22/12/98	0.8471
29/12/98	0.0295

**Tabla 10: Significancia de la diferencia en el contenido de humedad de las tablas para las diferentes posiciones (norte- sur) en diferentes fechas (*P. elliotti*).**

Factor	Tipo de secado	Nivel de Significancia
Pos*Fec	Intemperie	0.0001
Pos*Fec	Secadero	0.0299

De las tablas anteriores se desprenden las siguientes conclusiones en cuanto a la variación en la humedad de las tablas:

1- Existen diferencias significativas entre los datos de humedad en las distintas fechas en cualquiera de los dos tratamientos, vale decir, las tablas se fueron secando a medida que avanzó el proceso tanto a la intemperie como en el secadero (Tabla 8).

2- No hay diferencias significativas entre el promedio de la humedad de las tablas del secadero y de la intemperie, excepto en tres fechas (1/12, 29/12, 26/01), las cuales coinciden con días en los que se registraron precipitaciones, como el 29/12, o días en los que el contenido de humedad relativa a la intemperie era elevado, como el 26/01, donde se registró una humedad relativa de 72% (Tabla 9).

3- Tanto dentro como fuera del secadero se observan diferencias significativas entre tablas ubicadas en distinta posición (ventilador – no ventilador) en distintas fechas. Esto se explica por el efecto del viento producido por los ventiladores colocados en la pared norte del secadero y por la mayor incidencia de los rayos solares sobre ese mismo lado en la pila a la intemperie (Tabla 10).

#### 4.3.5.2. Efecto del viento.

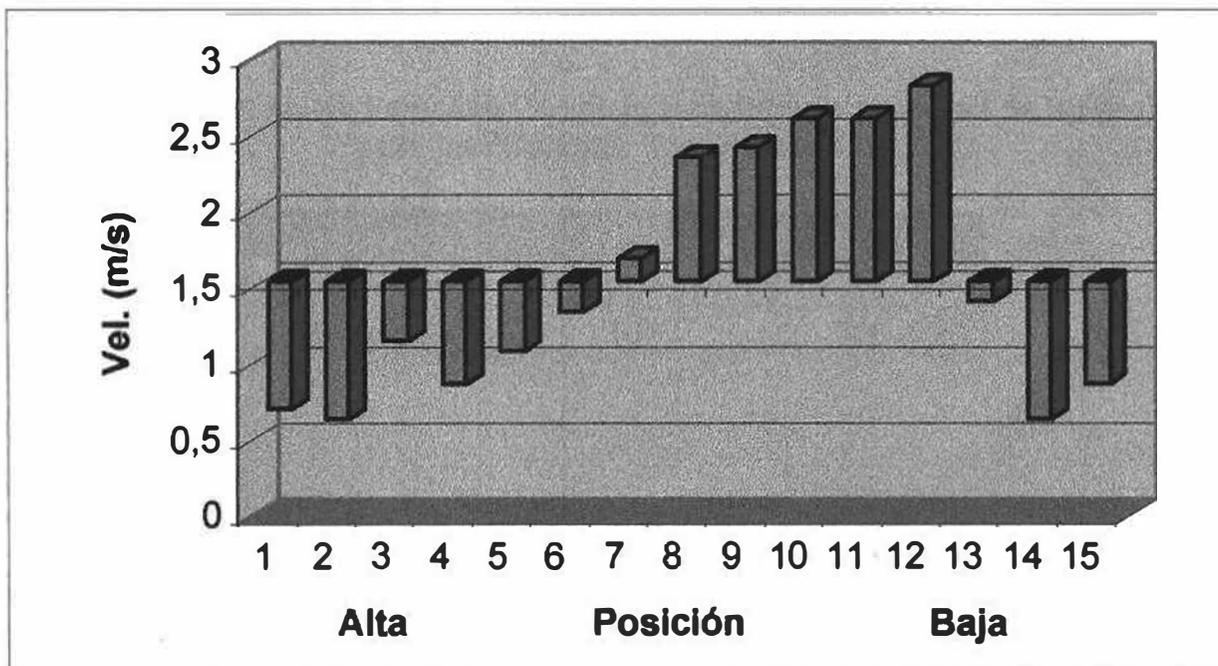
No existen diferencias significativas en la variación de la velocidad del viento entre las distintas zonas, es decir que la velocidad del viento era homogénea (en el plano horizontal) en todo el secadero (tanto hacia la puerta del mismo como en el fondo y el medio de la pila). Ahora bien, sí se observaron diferencias significativas cuando se analizaron las diferentes posiciones en altura en la camada, siendo en la zona media de

la pila donde se presenta la mayor velocidad del viento como se observa en la Tabla 11 y Gráfica 24. Este efecto diferencial del viento podría ser solucionado con la instalación de deflectores dentro del secadero.

**Tabla 11: Significancia de las diferencias en la velocidad del viento en la pila dentro del secadero.**

Factor	Significancia
Zona (este, medio, oeste)	0.5626
Posición en altura (1-15)	0.0116

**Gráfica 24: Diferencia de la velocidad del viento respecto de la media entre las distintas posiciones en altura en la pila dentro del secadero (*P. elliotti*).**



E.

## 4.3.5.3. Probetas de humedad.

Se evaluó la variación en el contenido de humedad interno y externo (sitio) de probetas provenientes de tablas secadas en el secadero y a la intemperie (secado). Los datos más relevantes pueden observarse en las Tablas 12 y 13 que se ven a continuación.

**Tabla 12: Nivel de significancia de los distintos factores de posible incidencia en la variación del contenido de humedad final (%) de las tablas (*P. elliotti*).**

Factor	Significancia
Secado	0.0001
Sitio	0.4413
Sitio*Secado	0.8010

**Tabla 13: Contenido de humedad (%) de la zona interna y externa de las probetas para los diferentes tipos de secado.**

Tipo de secado	Zona Externa	Zona Interna
Intemperie	20	21
Secadero	10	11

Analizando la interacción entre el tipo de secado y el sitio en la probeta, no se observaron diferencias significativas, es decir que se secaron en forma homogénea en cualquiera de los dos tratamientos.

También se concluye que hay diferencias significativas según el tipo de secado, encontrándose siempre más secas las probetas provenientes del secadero. Esto es lógico, ya que la madera alcanzó un menor contenido final de humedad dentro que fuera del secadero.

No se observaron diferencias significativas entre los valores de humedad de la parte interna y externa de la probeta, indicando que las tablas se secaron en forma homogénea en su espesor.

#### 4.3.5.4. Probetas de tensión de secado.

Los resultados del análisis de veinte probetas analizadas (diez del secadero y diez de la intemperie) se presentan en la Tabla 14.

**Tabla 14: Resultados del análisis estadístico de la variación en la tensión de las tablas según tipo de secado (*Pinus elliotti*).**

Tipo de Secado	Media	Significancia	Desvío Estándar	Significancia
Intemperie	-0.0023	0.0231	0.0045	0.0003
Secadero	0.0016		0.0011	

Al analizar la Tabla 14 se puede apreciar que existe una diferencia significativa entre las medias.

La media de las probetas de las tablas secadas a la intemperie dio un resultado negativo, indicando (según el test de Fuller) que los brazos de éstas se abrieron, por existir un mayor contenido de humedad en el exterior de las tablas. Contrariamente a lo ocurrido con las probetas de la intemperie, las provenientes del secadero presentaron una media positiva, indicando un mayor contenido de humedad en su interior.

Cabe aclarar que a pesar de que las diferencias entre humedad interior y exterior en el análisis de probetas de humedad no fue significativo, a través de las probetas de tensión se observa que alguna diferencia existió, siendo esta lo suficientemente importante como para provocar tensión.

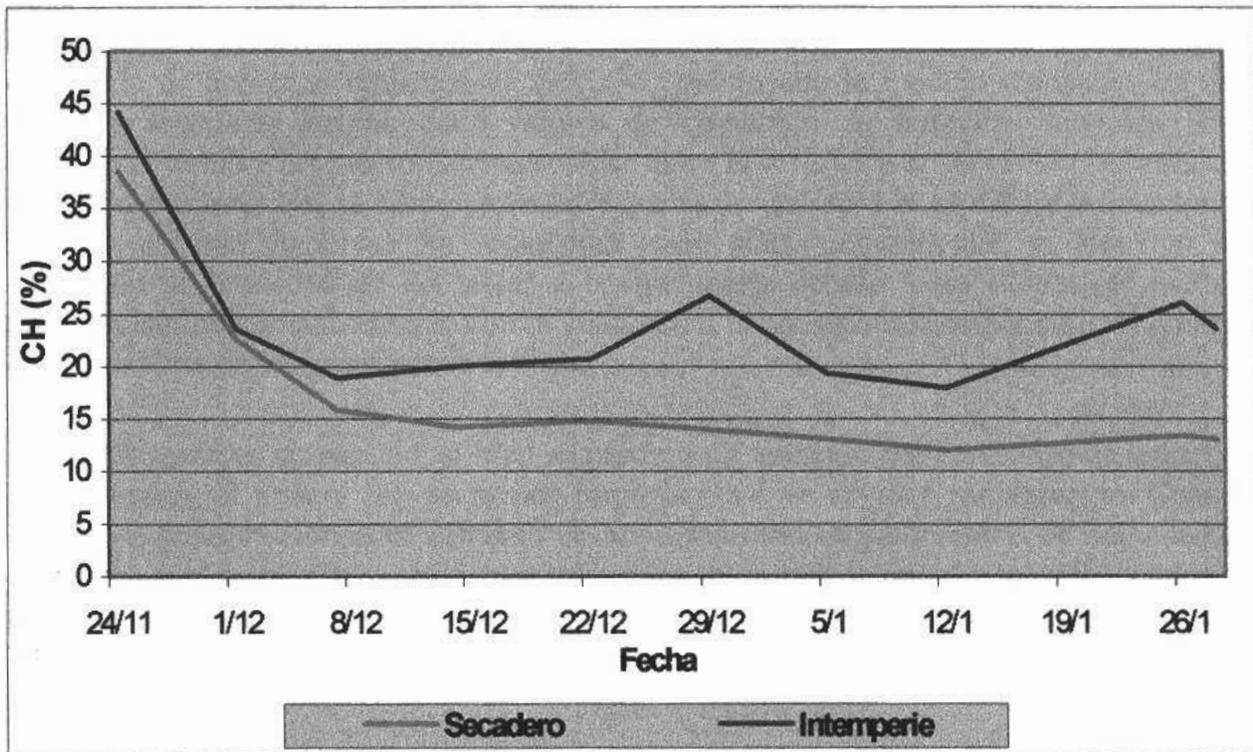
También es importante observar en esta tabla, la diferencia en el desvío estándar entre datos de las dos pilas, lo que indica una mayor variación de tensiones a la intemperie.

**Tabla 15: Significancia en la variación en tensión de secado de las tablas en secadero e intemperie respecto de cero. (*Pinus elliotti*).**

Factor	Significancia
Tensión en secadero	0.0013
Tensión en intemperie	0.1378

La Tabla 15 indica cuan significativo fue el movimiento de los brazos de las probetas. Es decir, analiza si la media de los datos del Test de Fuller es significativamente diferente de cero (valor cero indica que no hubo movimiento de los brazos).

Los datos de las probetas de la pila del secadero fueron significativamente diferentes de cero, mientras que los datos de las probetas de la pila a la intemperie no fueron significativos. La tensión que presentaron las probetas del secadero pudo haberse debido a las severas condiciones de secado dentro del secadero, lo que podría ser revertido o en el mejor de los casos evitado colocando algún sistema de vaporización dentro de este.

4.3.6. Comparación de las curvas de secado.**Gráfica 25: Evolución del contenido de humedad de las tablas en el secadero y a la intemperie (*P. elliotti*).**

Observando las curvas de secado a la intemperie y en el secadero (Gráfica 25), en éste último se nota claramente que se logra una menor humedad final y un secado más rápido.

La estiba realizada a la intemperie presentaba un contenido de humedad inicial de 44.2%, mientras que la estiba del secadero presentaba un 38.6% de humedad. Dichas cargas alcanzaron una humedad final de 23.6% y 13.0% respectivamente en un período de 62 días. Es importante aclarar que ambas cargas habían logrado dos semanas antes de concluido el proceso (12/1/99), contenidos de humedad inferiores a los registrados al final del proceso. Este aumento en el contenido de humedad final de las tablas se debió a las adversas condiciones climáticas reinantes en esas dos últimas semanas.

Como era de esperar, las precipitaciones tienen mayor influencia sobre el contenido de humedad de la madera secada a la intemperie. Esto puede apreciarse en el dato de

contenido de humedad de las tablas del día 26 de enero, que representa un incremento en la misma respecto a la medida anterior, puesto que pasó de un contenido de humedad de 17.9% a uno de 26.0%. Esto se debió a que durante este periodo de dos semanas, llovieron 186 mm. El aumento registrado en el contenido de humedad de las tablas dentro del secadero se pudo deber al aumento de la humedad relativa ambiente durante estas semanas o bien a que debido a las intensas lluvias entró agua dentro del secadero debido a una falla en la construcción. Algo muy similar ocurre en la medida de contenido de humedad realizada el 29/12/98, puesto que la medida realizadas las dos semanas anteriores habían dado valores de contenido de humedad menores. Esto también se debió a las precipitaciones caídas entre el 7/12/98 y el 29/12/98 (242 mm). Es importante aclarar que la única protección que se le realizó a la estiba de la intemperie fue una camada de tablas sin separación entre ellas. Seguramente, el aumento del contenido de humedad de las tablas a la intemperie debido a las lluvias, se hubiera podido disminuir sensiblemente con la colocación de un techo de mejor calidad (chapas de zinc o fibra de vidrio) sobre la estiba.

En el secadero en cambio, si bien se produjo un aumento del contenido de humedad de las tablas, el mismo fue de menor importancia y se revirtió rápidamente. Cuando existieron precipitaciones, el aumento de humedad relativa y contenido de humedad de equilibrio que se produce a la intemperie siempre es mayor que dentro del secadero y además se revierte más lentamente. También existe una menor variación en la temperatura dentro del secadero cuando ocurren precipitaciones.

## 5. CONCLUSIONES.

En los tres ensayos realizados el secadero solar fue efectivo para las condiciones en las que se realizaron los ensayos.

En el ensayo de tablas de *Eucalyptus grandis* de 3.81 cm de espesor, el contenido de humedad inicial de las tablas con las cuales se realizó el ensayo fue de 62.8% para la estiba armada en el secadero, y de 68.2% para la armada a la intemperie. Dichas cargas llegaron a una humedad final de 11.3% dentro del secadero y 19.9% a la intemperie en 78 días. Si la humedad objetivo hubiera sido la alcanzada a la intemperie, con el secadero solar esta se hubiera logrado en casi un tercio del tiempo requerido para secarse a la intemperie.

En el caso de las tablas de *Eucalyptus tereticornis* de 15 mm de espesor, la estiba, armada dentro del secadero, presentaba un contenido de humedad inicial de 26.8%, llegando a una humedad final de 11.5% en 57 días.

En el ensayo de *Pinus elliotti* (tablas de 3.81 cm de espesor), la estiba realizada a la intemperie presentaba un contenido de humedad inicial de 44.2%, mientras que la estiba del secadero presentaba un 38.5% de humedad. Dichas cargas alcanzaron una humedad final de 23.6% y 13.0% respectivamente en un período de 62 días. El menor contenido de humedad logrado a la intemperie, 17.9% el 12/1/99 (séptima semana), se alcanzó en el secadero al finalizar la segunda semana, es decir poco menos de un tercio del tiempo requerido para alcanzar este mismo valor a la intemperie.

Una de las fuentes de variación identificada dentro del secadero fue la velocidad del aire. Para reducirla sería conveniente disminuir la altura total de las pilas, aumentar la distancia del suelo de la parte inferior de la pila, o mejorar la conducción del aire a través de la pila mediante la instalación de deflectores.

El período del año en el que se realizó el ensayo, sin lugar a dudas fue determinante en los resultados obtenidos. La eficiencia del secadero es mayor a medida que se alargan los días, aumenta la radiación solar global, aumenta la temperatura y disminuye la humedad relativa a la intemperie.

Por otra parte, la duración de los períodos severos diarios de secado se mantienen relativamente intensos durante más tiempo cuando la longitud del día es mayor. Las condiciones de secado más severas se dan más temprano en la tarde a medida que los días se acortan.

El secado solar pierde eficiencia secando maderas en estado verde o por encima del punto de saturación de las fibras. También se enlentece el proceso cuando el contenido de humedad es muy bajo, aunque siempre se lograron contenidos de humedad inferiores que a la intemperie.

El hecho de introducir madera en estado verde sería favorable para disminuir el colapso y otros defectos provocados por el proceso de secado.

Se considera conveniente la instalación de un techo de mejor calidad que el utilizado en las estibas a la intemperie, ya que el techo construido en los ensayos 1 y 3 no fue eficaz para evitar el excesivo aumento en el contenido de humedad de las tablas durante los días de lluvia. Dicho techo podría ser fabricado con chapas de zinc o fibra de vidrio. También es recomendable, realizar una inspección general del secadero antes del inicio de cada ensayo para comprobar que su estructura se encuentre en óptimas condiciones.

Para un mejor seguimiento de la evolución del contenido de humedad no es recomendable utilizar un contenido de humedad inicial promedio, sino considerar la humedad inicial de cada una de las muestras por separado, principalmente cuando el contenido de humedad inicial de toda la pila es heterogéneo.

También es importante considerar la posibilidad de instalar en el secadero, una fuente de calor adicional como ser una pequeña caldera para evitar el excesivo enfriamiento de la cámara de secado durante la noche. Esto sumado a la instalación de un humidificador mejoraría tanto la calidad como la velocidad de secado.

## 6. RESUMEN.

Para estudiar la eficiencia del uso de un secadero solar de tipo semi-invernadero, se realizaron tres ensayos en el predio de la Facultad de Agronomía (38° 50' 13" Lat. Sur) donde se secó una estiba de tablas de *Eucalyptus grandis* de 3.81 cm de espesor, una de *Eucalyptus tereticornis* de 1.27 cm y otra de *Pinus elliotti* de 3.81 cm de espesor.

Tanto en el ensayo realizado con tablas de *Eucalyptus grandis* (ensayo 1) como en el de *Pinus elliotti* (ensayo 3) se compararon los resultados del secado solar con los obtenidos en el secado a la intemperie de estibas similares.

Los resultados indican que la eficiencia del secado solar es buena respecto al secado a la intemperie. En la carga de *Eucalyptus grandis* se llegó a una humedad final de 11.3 % dentro del secadero y de 19.9 % a la intemperie en 78 días. En la carga de *Eucalyptus tereticornis* se llegó a un 11.5 % dentro del secadero en 57 días. En *Pinus elliotti* se alcanzó una humedad final de 13.0 % dentro del secadero a los 62 días del proceso, mientras que en el mismo período la carga a la intemperie llegó a un contenido de humedad final de 23.6 %.

Palabras clave: Secadero, Energía, Solar, Humedad, Madera.

## 7. SUMMARY.

In order to study the use of a semi - greenhouse solar kiln, three tests were made at the Agronomy University (38°50' 13" Lat. S.). A strack of 3.81 cm thick Eucalyptus grandis boards, another of 1.27 cm thick Eucalyptus tereticornis boards, and one of 3.81 cm thick Pinus eliotti boards were dried there.

As in the test of Eucalyptus grandis boards (test 1), in the test of Pinus eliotti boards (test 3), the solar drying results were compared with the results obtained of air-dried similar straks.

The results indicate that solar drying efficiency is good, in comparison with air drying. The Eucalyptus grandis strack reached 11.3% final moisture content inside the solar kiln and 19.9% outside the kiln, in 78 days. The Eucalyptus tereticornis strack reached 11.5% inside the kiln in 57 days; while the Pinus eliotti strack reached 13.0 and 23.6% final moisture content inside and outside the kiln respectively, in 62 days.

Key words: Dry kiln, Energy, Solar, Moisture content, Lumber.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

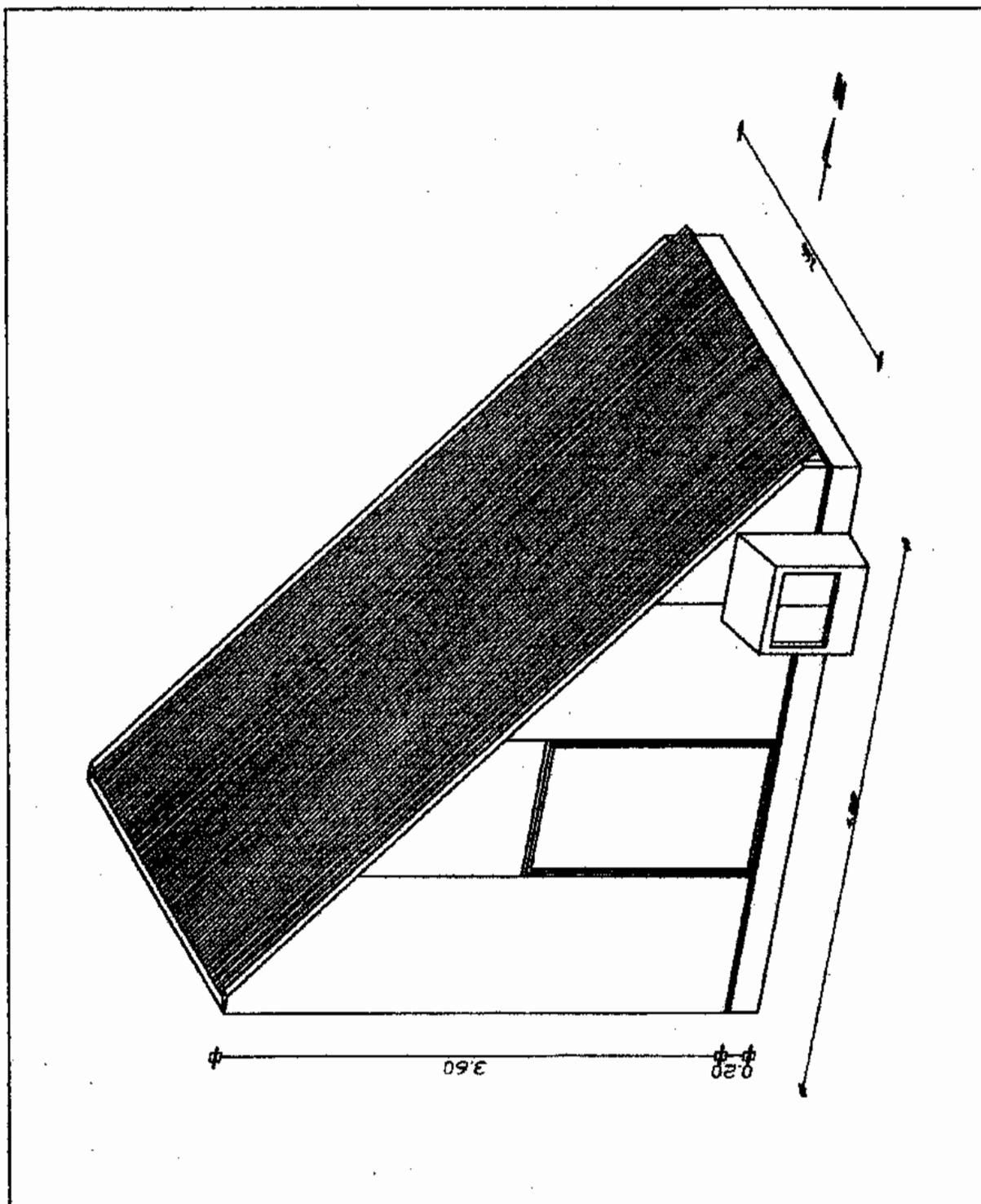
1. BAUER, K.; BUX, M.; RODRIGUEZ, A.V. 1999. Secagem solar de madeira de Eucalipto em escala industrial. In Técnicas de Abate, Processamento e Utilizacão da Madeira de Eucalipto, (1999, Vicosa, Minas Gerais), Universidade Federal de Vicosa. pp 34- 38.
2. CHUDNOFF, M.; MALDONADO, E.D.; GOYTÍA, E. 1966. Solar drying of tropical hardwoods. Forest Service Research Paper ITF-2. Río piedras, Puerto Rico. Institute of Tropical Forestry. 26p.
3. FULLER, James. 1995. Conditioning stress development and factors that influence the prong test. Research Paper FPL-RP-537. Madison, WI:US. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 6p.
4. GOUGH, D.K. 1981. Timber seasoning in a solar kiln. Department of Forestry, Queensland. Technical paper N°24. 6p.
5. HART, C.A. 1968. El secado de la madera. The North Carolina Agricultural Extension Service. 15p.
6. JOVANOVSKI, A.; AMATURI, G. 1995. Evaluación de un secadero solar en el noroeste de Chubut (42° 58' Lat. Sur). Esquel, Chubut, Argentina. 10p.
7. LUMLEY, T.G.; CHOONG, E.T. 1978. Technical and economical characteristics of two solar kiln designs. Forest Products Journal 29 (7) 49-56.
8. MANTERO, C; BURGUEÑO, J; BUZZO, R. 1996. Secado solar de tablas de pino en Sayago, Montevideo (34°50' 13'' Lat. Sur). Montevideo, Revista Ciencia N°3. 23p.
9. PALMER, G.; KLEINSCHMIDT, S.D. 1992. Timber seasoning in a kiln. Queensland Forest Service. Technical Paper N°50. 8p.
10. PLUMPTRE, R.A. 1985. Solar drying kilns for sawnwood. Commonwealth Forestry Bureau. Forest products abstracts. 33-45.
11. ROSEMBERG, N.; BLAD, B.; VERNA, S, 1983. Microclimate the Biological Environment. 2ª ed New York. John Wiley & Sons. 495p.

12. SÁNCHEZ ACOSTA, M.; REMBADO, G. 1988. Pérdida de humedad por estacionamiento de madera en rollo de *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden. In Congreso Forestal Argentino, (4º, 1988, Santiago del Estero). Santiago del Estero. El liberal. pp.616-619.
13. SIMPSON, W. T. 1991. Dry kiln operator's manual. United States Department of Agriculture., Madison, Wisconsin. 274p.
14. SIMPSON, W.T.; TSCHERNITZ, J.L. 1984. Solar dry kiln for tropical latitudes. Forest Products Journal 34 (5): 25-34.
15. SIMPSON, W.T.; TSCHERNITZ, J.L. 1984. Performance of a solar/wood energy kiln in tropical latitudes. . Forest Products Journal 23-34.
16. SMITHSONIAN INSTITUTION, 1951. Smithsonian Meteorological Tables. 6ª ed Washington., Robert J. List. 527p.
17. TABOADA, V.; CORONEL, E.; GUIMARD, F. 1996. Cámara de secado de madera aserrada por energía solar. Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero. 58-62.
18. TUSET, R.; DURÁN, F. 1986. Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización. Montevideo, Hemisferio Sur. 696p.
19. UNIVERSITY OF MINNESOTA (UNITED STATES OF AMERICA). KAUFERT LABORATORY 1995. Kiln Drying Short Course. September 11-14, 1995. Pv.
20. WENGERT, E.M. 1971. Improvements in solar dry kiln design. U.S.Department of Agriculture. 10p.

## 9. Anexo.

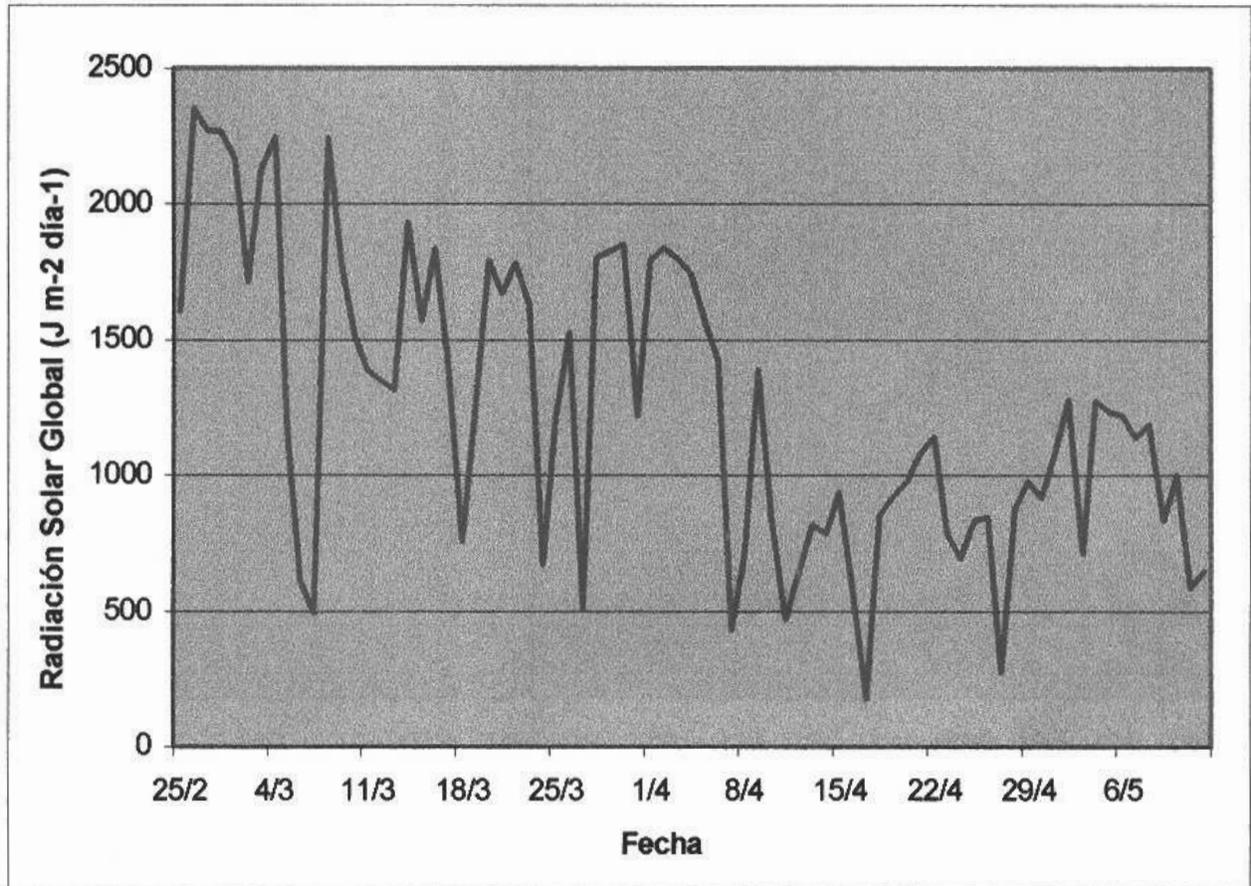
ANEXO 1

Perspectiva aérea del secadero solar.

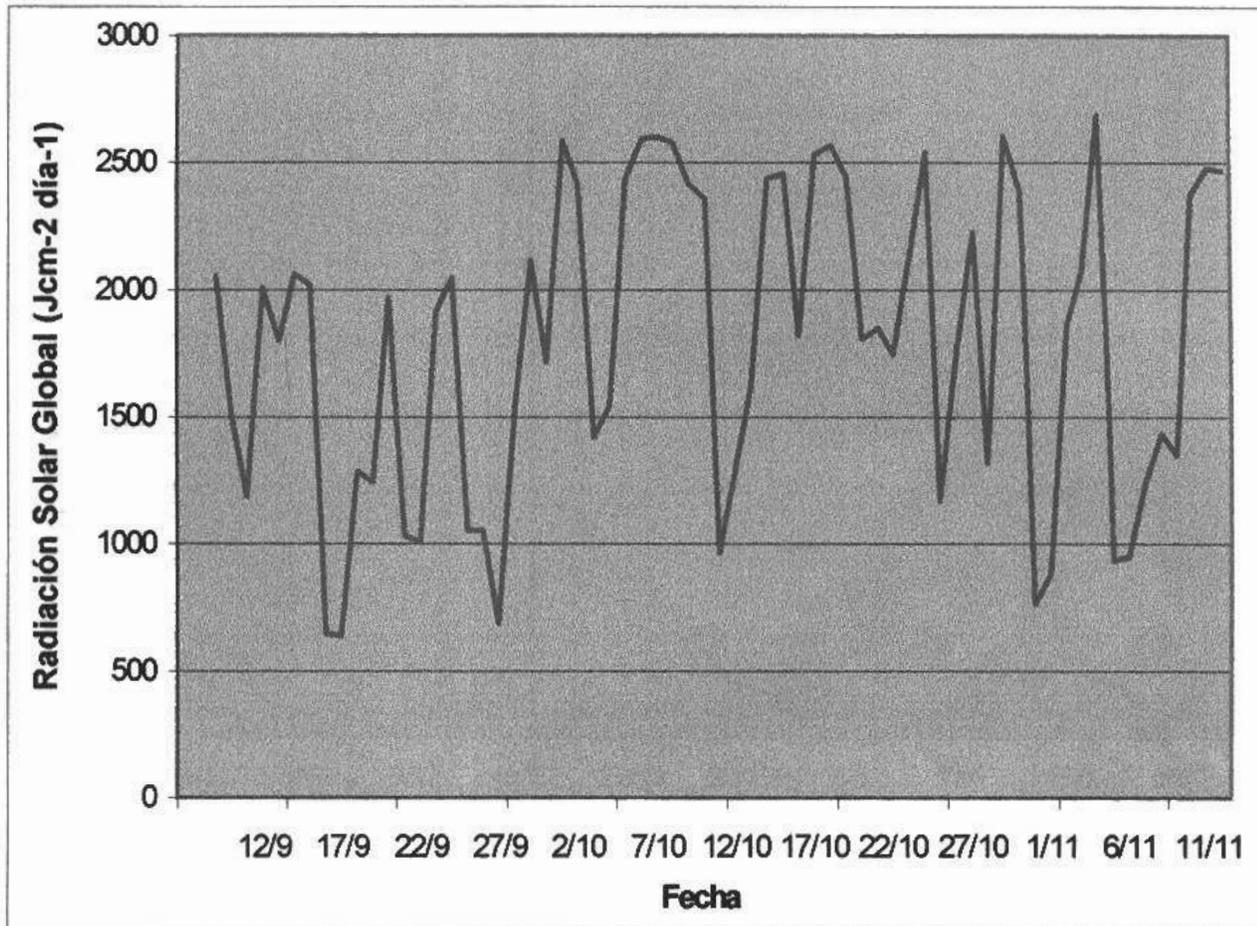


## ANEXO 2

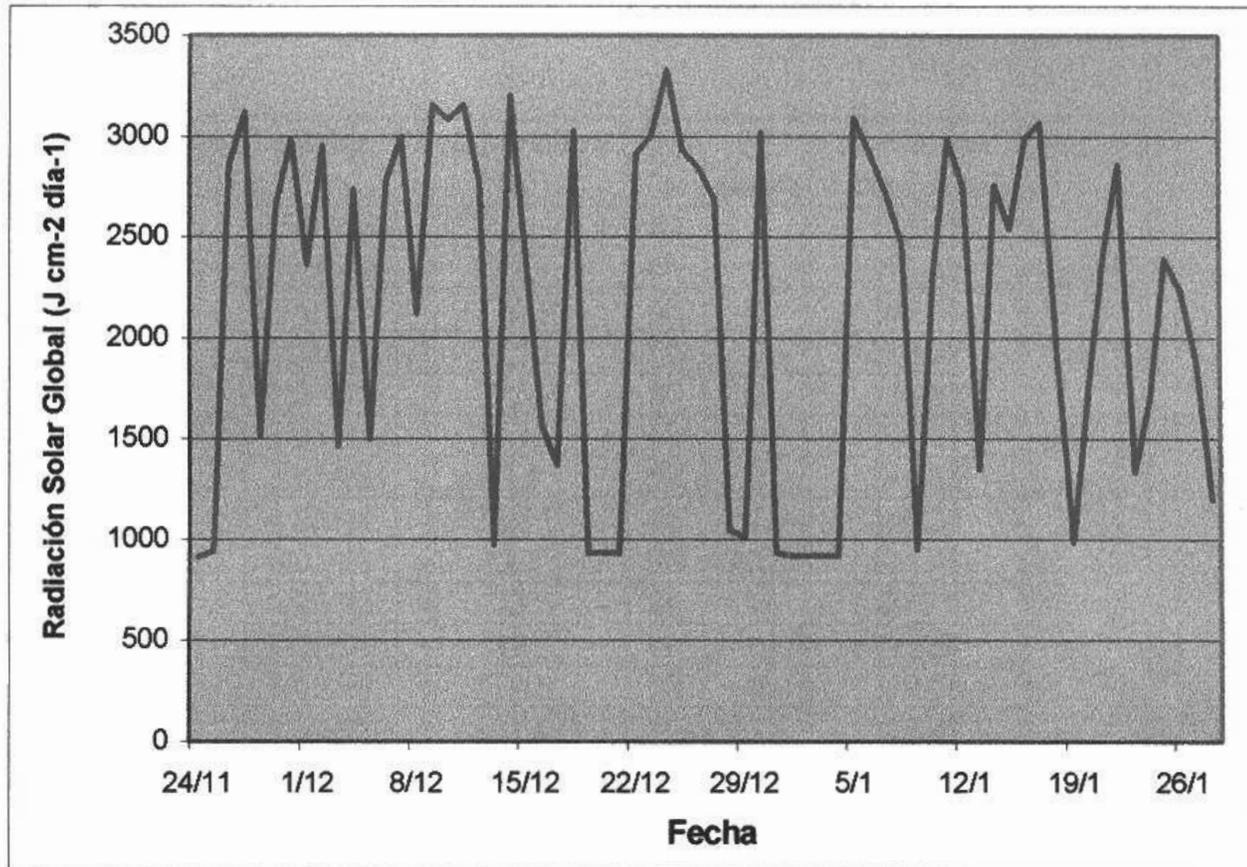
### Evolución de la Radiación Solar Global durante el ensayo 1 (*Eucalyptus grandis*).



**Evolución de la Radiación Solar Global durante el ensayo 2**  
**(*Eucalyptus tereticornis*).**



**Evolución de la Radiación Solar Global durante el ensayo 3 (*Pinus elliotti*).**



## ANEXO 3

Datos proporcionados por la Cátedra de Agrometeorología correspondientes a la E.A.M. de Sayago, para el período de secado correspondiente al ensayo 1:

Fecha	Temperatura °C	HR %	PP (mm)	Radiación J cm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
25/02/98	23.1	82	0	185.67
26/02/98	23.65	66	0	272.33
27/02/98	22.25	53	0	263.00
28/02/98	20.15	62	0	262.29
1/03/98	19.55	67	0	250.88
2/03/98	21.15	62	0	198.38
3/03/98	23.5	97	0	246.13
4/03/98	25.45	56	24.9	260.25
5/03/98	23.5	96	30.8	134.71
6/03/98	23	96	38	70.92
7/03/98	18	90	0.9	56.79
8/03/98	21.55	73	0	259.88
9/03/98	20.85	79	30.4	205.42
10/03/98	17.95	61	0	175.42
11/03/98	17.1	48	1.3	160.54
12/03/98	17.75	87	0	156.08
13/03/98	16.95	65	1.8	152.33
14/03/98	18.5	60	0	223.75
15/03/98	18.35	58	0	181.88
16/03/98	18.65	73	0	212.75
17/03/98	20.6	64	0.3	165.75
18/03/98	20.6	92	0.2	87.42
19/03/98	21.05	85	0	141.92
20/03/98	20.8	93	0	207.50
21/03/98	20.65	72	0	193.42
22/03/98	20.55	65	0	206.29
23/03/98	21.9	78	0.4	188.42
24/03/98	19	69	0	77.58
25/03/98	14.7	68	0	139.75
26/03/98	16.45	60	0	176.50
27/03/98	14.6	84	0.6	58.79
28/03/98	16.95	89	0	208.79

Fecha	Temperatura °C	HR %	PP (mm)	Radiación J cm-2 dia-1
29/03/98	18.5	62	0	211.50
30/03/98	19.55	62	0	214.29
31/03/98	17.55	64	0	140.92
1/04/98	15.55	57	0	207.75
2/04/98	13.95	80	0	212.92
3/04/98	16.75	65	0	208.04
4/04/98	16.45	73	0	202.17
5/04/98	19.85	86	0	182.38
6/04/98	21	82	7.7	164.75
7/04/98	16.95	93	5.6	49.83
8/04/98	16.05	91	0	81.58
9/04/98	13.75	66	0	161.04
10/04/98	17.2	78	3.9	96.75
11/04/98	16.75	95	0.1	54.13
12/04/98	18.25	96	0.2	74.54
13/04/98	20.5	97	0	94.75
14/04/98	21.55	92	0	91.17
15/04/98	20	96	0	108.29
16/04/98	20.25	94	2	68.08
17/04/98	17.25	82	22.5	20.54
18/04/98	17.5	74	0	99.04
19/04/98	17.7	74	0	106.71
20/04/98	14.9	94	0	113.29
21/04/98	18.35	67	0	125.54
22/04/98	17.55	86	0	132.17
23/04/98	18.85	94	0	91.17
24/04/98	19.05	92	0.3	80.13
25/04/98	18.15	97	0.1	96.25
26/04/98	20.3	87	0	98.25
27/04/98	17.8	93	64.5	31.54
28/04/98	16.65	98	0.6	101.79
29/04/98	15.95	87	3.2	113.33
30/04/98	15.2	76	0	106.29
1/05/98	21.15	64	0	125.67
2/05/98	16.45	60	0	147.79
3/05/98	12.9	94	0	82.29
4/05/98	12.9	97	0	147.46
5/05/98	17.4	88	0	143.04
6/05/98	21	68	0	141.13

<b>Fecha</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>HR %</b>	<b>PP (mm)</b>	<b>Radiación J cm-2 dia-1</b>
7/05/98	22.5	70	0	132.08
8/05/98	22.45	72	0	137.67
9/05/98	19.2	88	0	96.21
10/05/98	17.95	87	0	115.88
11/05/98	18.6	75	0	67.75
12/05/98	19.25	85	0	75.25

## ANEXO 4

Datos proporcionados por la Cátedra de Agrometeorología correspondientes a la E.A.M. de Sayago, para el período de secado correspondiente al ensayo 2:

Fecha	Temperatura bulbo		Tmax °C	Tmin °C	T prom °C	H.R. %	PP (mm)	Radiación J cm-2 dia-1
	seco °C	humedo °C						
9/09/98	12.80	9.40	16.70	4.30	10.50	58.00	0	2054.49
10/09/98	14.40	11.20	19.50	6.40	12.95	67.00	4.7	1498.20
11/09/98	19.40	16.00	22.50	13.00	17.75	72.00	0	1185.09
12/09/98	14.60	13.30	22.50	9.40	15.95	83.00	0	2007.09
13/09/98	11.80	8.60	13.00	7.10	10.05	58.00	0	1799.60
14/09/98	11.50	8.10	14.70	3.50	9.10	58.00	0	2062.26
15/09/98	11.20	8.20	17.60	4.40	11.00	67.00	0	2018.65
16/09/98	14.20	9.90	20.40	5.50	12.95	54.00	0.1	648.14
17/09/98	15.40	13.40	15.70	8.00	11.85	82.00	1.5	634.20
18/09/98	9.40	7.20	12.60	8.00	10.30	72.00	2.9	1283.88
19/09/98	10.60	8.30	12.80	6.50	9.65	73.00	4	1240.68
20/09/98	10.40	9.50	13.40	8.10	10.75	94.00	0	1967.56
21/09/98	12.80	10.60	16.50	8.80	12.65	76.00	0	1031.05
22/09/98	16.30	13.00	18.20	10.20	14.20	66.00	0.8	1003.14
23/09/98	16.60	13.00	21.10	10.80	15.95	64.00	0	1913.78
24/09/98	17.20	15.50	20.80	12.30	16.55	82.00	0	2046.02
25/09/98	19.10	13.40	24.40	9.60	17.00	48.00	64.5	1053.06
26/09/98	18.10	14.60	20.20	9.10	14.65	67.00	1.1	1052.47
27/09/98	11.40	9.30	13.20	9.40	11.30	71.00	0	687.59
28/09/98	11.20	8.60	14.10	7.80	10.95	66.00	0	1559.23
29/09/98	14.00	10.00	19.00	4.60	11.80	50.00	0	2118.52
30/09/98	18.60	12.20	21.50	7.50	14.50	38.00	0	1714.27
1/10/98	17.10	12.10	21.00	8.50	14.75	47.00	0	2586.68
2/10/98	16.60	13.20	20.60	8.20	14.40	58.00	0	2415.94
3/10/98	18.00	16.00	22.60	12.00	17.30	83.00	6.2	1417.17
4/10/98	22.20	19.10	24.00	15.60	19.80	70.00	0	1546.54
5/10/98	13.90	10.90	16.00	11.50	13.75	61.00	0	2435.25
6/10/98	16.00	10.60	21.00	5.00	13.00	42.00	0	2592.55
7/10/98	16.00	10.60	22.70	7.50	15.10	44.00	0	2601.45
8/10/98	16.60	12.80	22.70	9.30	16.00	58.00	0	2580.56

Fecha	Temperatura bulbo		Tmax °C	Tmin °C	T prom °C	H.R. %	PP (mm)	Radiación J cm-2 dia-1
	seco °C	humedo °C						
9/10/98	18.80	15.80	24.60	11.30	17.95	68.00	0	2417.73
10/10/98	20.60	16.80	25.00	14.40	19.70	63.00	0	2355.33
11/10/98	18.90	16.30	21.30	14.60	17.95	75.00	0	964.38
12/10/98	18.4	15.8	20.2	13.2	16.70	71.00	0	1292.44
13/10/98	15.4	13.1	17.8	11.6	14.70	71.00	0	1617.70
14/10/98	17.2	14.2	23.5	8.3	15.90	67.00	0	2439.53
15/10/98	19.2	17	26	12	19.00	83.00	0	2455.78
16/10/98	19.9	18.3	22.2	16.5	19.35	84.00	0	1820.67
17/10/98	18.2	13.4	20.9	12.8	16.85	50.00	0	2533.78
18/10/98	20	15.2	25.5	9.7	17.60	55.00	0	2568.35
19/10/98	20.4	16	26.5	9.7	18.10	56.00	0	2446.80
20/10/98	22.5	18.2	28	13.6	20.80	57.00	0	1806.02
21/10/98	23	18.2	30.7	15	22.85	62.00	24.5	1849.87
22/10/98	26.2	20.2	31.8	19.3	25.55	52.00	0	1744.09
23/10/98	16.2	11.8	17.5	14.3	15.90	44.00	0	2137.36
24/10/98	15.8	11	18.4	8.5	13.45	35.00	0	2541.13
25/10/98	17.6	13.6	22.1	9.4	15.75	52.00	0	1169.11
26/10/98	18.9	17	22.2	9.4	15.80	75.00	0	1752.15
27/10/98	21.8	19	25.3	14.5	19.90	65.00	1.5	2227.98
28/10/98	20.2	12.4	22	9	15.50	26.00	0	1318.36
29/10/98	15.9	10.5	17.4	11.2	14.30	37.00	0	2608.03
30/10/98	16.4	11.6	20.2	6.3	13.25	45.00	0	2386.30
31/10/98	18.1	16	19.2	8.4	13.80	50.50	0	765.13
1/11/98	18.2	13	20.4	8.9	14.65	42.00	0	882.09
2/11/98	19.8	14.4	20.5	10.6	15.55	43.00	0	1861.71
3/11/98	19.7	15.9	22.8	13.5	18.15	64.00	1.1	2075.50
4/11/98	22	18.2	23	13.2	18.10	56.00	0	2687.96
5/11/98	17.7	16.6	18.7	14.6	16.65	85.00	20.6	933.72
6/11/98	18.4	15.4	18.7	13.1	15.90	64.00	0	947.91
7/11/98	16	14.6	19.5	12.8	16.15	79.00	0	1241.78
8/11/98	18.8	15.2	19.5	13.4	16.45	56.00	14.5	1434.55
9/11/98	18.8	15.8	21.4	13.2	17.30	68.00	0	1348.55
10/11/98	19.6	16.2	22.5	12.4	17.45	60.00	0	2380.26
11/11/98	18.7	14.6	23.5	11.5	17.50	52.00		2478.55
12/11/98	22.5	19.2	25.2	16	20.60	62.00		2466.25

## ANEXO 5

Datos proporcionados por la Cátedra de Agrometeorología correspondientes a la E.A.M. de Sayago, para el periodo de secado correspondiente al ensayo 3:

Fecha	Temperatura bulbo		Tmax °C	Tmin °C	Tprom °C	H.R. %	PP (mm)	Radiación J cm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
	Seco °C	Humedo °C						
24/11/98	23.1	20.7	24	17.4	20.7	76	8.2	912.46
25/11/98	15.8	15.2	22.7	15	18.85	90	4.5	942.83
26/11/98	22.6	16.4	27.5	10.6	19.05	38	0	2853.78
27/11/98	25.5	17.1	28.9	15.3	22.1	34	0	3118.78
28/11/98	18.7	15	29	16.6	22.8	57	0	1514.12
29/11/98	22.7	18.1	26.5	12.7	19.6	52	0	2663.42
30/11/98	23.7	16.9	28.5	13.8	21.15	39	0	2984.85
1/12/98	27.2	20.2	31.3	16.7	24	48	0	2364.72
2/12/98	25.6	21.4	29.8	17.6	23.7	57	0	2956.82
3/12/98	26	21	30.9	19.4	25.15	57	4.6	1461.69
4/12/98	26.7	22.2	30.4	17.4	23.9	57	0	2738.30
5/12/98	18.4	15.2	20.2	15.1	17.65	66	0	1495.10
6/12/98	19.4	13.6	21.8	14.1	17.95	45	0	2776.62
7/12/98	21.4	16.7	27.5	12.1	19.8	55	0	2999.36
8/12/98	26	17.2	28.6	18	23.3	25	1.3	2118.69
9/12/98	20.4	16.8	21.7	16.5	19.1	66	0	3155.67
10/12/98	20.8	13.6	26.6	10.8	18.7	35	0	3084.16
11/12/98	24.7	19.8	27.5	15.1	21.3	54	0	3153.11
12/12/98	23.6	21.5	26.7	18.1	22.4	78	42.9	2773.88
13/12/98	18.1	17.7	21.9	17.1	19.5	94	0	969.60
14/12/98	21.7	18.4	24.5	15.4	19.95	62	0	3202.22
15/12/98	23.8	17.2	27.9	14	20.95	38	9.9	2402.75
16/12/98	17.3	16.5	20.9	16.5	18.7	93	48.5	1562.90
17/12/98	20.4	17.7	21.4	14.5	17.95	68	2.5	1370.85
18/12/98	19.6	16.4	22	16.5	19.25	70		3028.09
19/12/98	s.i	s.i	27	14	20.5	65	0	935.16
20/12/98	22.4	19	24.9	12.5	18.7	66	4.1	935.16
21/12/98	19	17.8	25	16.3	20.65	90	37.2	935.16
22/12/98	18.6	13.8	21.6	14.2	17.9	46		2910.70
23/12/98	21.1	15.2	27	13	20	42	0	3002.32

Fecha	Temperatura bulbo		Tmax °C	Tmin °C	Tprom °C	H.R. %	PP (mm)	Radiación J cm-2 dia-1
	Seco °C	Humedo °C						
24/12/98	25.6	18.9	30.2	15.6	22.9	43	0	3331.58
25/12/98	27.9	20.2	31.7	17.8	24.75	42	0	2930.17
26/12/98	28.7	22.5	33.3	20.3	26.8	50	0	2847.71
27/12/98	31.1	24.7	34.3	22	28.15	54	36	2686.53
28/12/98	21.4	21	24.8	19.8	22.3	94	47	1047.08
29/12/98	18.8	16.8	20.5	15.4	17.95	72	12.2	1015.42
30/12/98	19.4	15.6	24.8	16	20.4	58	0	3021.43
31/12/98	19.7	16.8	21.8	17.6	19.7	66	0	935.16
1/1/99	21	s.i	27.7	12.7	20.2	70.4	0.3	919.18
2/1/99	20.8	s.i	22.3	17.7	20	84	0	919.18
3/1/99	21.2	s.i	27.3	13.2	20.25	57	2.2	919.18
4/1/99	20.5	20.2	24.7	11.9	18.3	86	11.7	919.18
5/1/99	18.6	14.6	20.6	14.2	17.4	59	0	3092.64
6/1/99	20.2	15.8	22.4	11	16.7	53	0	2922.10
7/1/99	21.9	17.6	26.7	13	19.85	56	0	2719.92
8/1/99	24.2	19.9	27.5	16.7	22.1	60	1.6	2472.82
9/1/99	18.6	17	20	10.5	15.25	83	0	953.31
10/1/99	19	14.5	20.3	14.6	17.45	49	0	2299.92
11/1/99	19.3	14.5	22.5	13.5	18	48	0	2990.83
12/1/99	21.3	15.9	24.3	12.4	18.35	48	0	2741.84
13/1/99	22.3	18.3	25.1	13.9	19.5	63	0	1351.07
14/1/99	18.1	13.6	20.8	15.6	18.2	54	0	2763.28
15/1/99	20.4	15.6	23	16.1	19.55	55	0	2544.69
16/1/99	23	17.8	25.3	12.5	18.9	50	0	2991.03
17/1/99	24.5	17.6	30.3	16	23.15	46	0	3068.26
18/1/99	28.5	22.6	31.9	16.1	24	55	0	1910.02
19/1/99	21.8	18.9	24.5	20.1	22.3	72	3.6	985.59
20/1/99	22	20.6	24.7	12.5	18.6	85	0	1731.42
21/1/99	23.8	21.5	26.5	19.8	23.15	79	0	2408.42
22/1/99	24	21.6	26.4	12.5	19.45	80	0	2859.81
23/1/99	25.3	22.6	29.5	20	24.75	76	182	1337.89
24/1/99	24.8	22.7	28	20	24	84	0.5	1702.27
25/1/99	22.8	19.4	24.5	19.8	22.15	62	0.2	2392.80
26/1/99	22.6	20.2	25.3	17.5	21.4	74	0	2236.79
27/1/99	23.3	20.3	26.4	17.9	22.15	68	0	1900.23
28/1/99	23.8	20.3	25.4	19.1	22.25	67	0	1198.06