



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-555

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
**Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017**  
**ISBN 978-84-941695-2-6**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Aplicación de técnicas de secado artificial al corcho en plancha de *Quercus Suber L.*

CARPINTERO, E.<sup>1</sup>, JURADO, M.<sup>2</sup> y PRADES, C.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IFAPA Centro Alameda del Obispo, Avd. Menéndez Pidal, 14080 Córdoba.

<sup>2</sup> Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba.

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba.

### Resumen

En la actualidad, la totalidad del corcho para fabricación del tapón natural se seca al aire libre durante un periodo mínimo de 6 meses. Este estudio evalúa la posibilidad de aplicar técnicas de secado artificial a las planchas de corcho. Para ello, se han utilizado dos colectivos de muestras: uno secado al aire libre siguiendo el procedimiento tradicional y otro secado en cámara durante 14 días. A ambos se les ha controlado la evolución de la humedad y se han comparado mediante el análisis del calibre, calidad, porosidad, color y comportamiento a compresión.

La reducción en el contenido de humedad ha sido similar para ambos métodos, y se ha experimentado un mayor incremento del calibre con el método artificial. No se han apreciado diferencias estadísticamente significativas en el coeficiente de porosidad, ni en el comportamiento a compresión. Las diferencias detectadas para la calidad podrían atribuirse a la subjetividad del método de clasificación. Los resultados destacan el secado en cámara como una técnica apta para su aplicación al corcho, reduciendo el tiempo de secado y los costes de inmovilizado de la materia prima. Su aplicación supondría una innovación en el proceso de transformación y permitiría controlar las variables climáticas que condicionan el proceso de secado.

### Palabras clave

Calibre, humedad, calidad del corcho, porosidad, compresión, secado tradicional al aire libre, secado artificial en cámara.

## 1. Introducción

El corcho o corteza externa del alcornoque es un tejido vegetal muy heterogéneo, cuya aplicación más importante desde el punto de vista económico es el tapamiento, sector al que se destina casi el 70% de la producción (APCOR, 2010). Tras la extracción del corcho en planchas, su proceso de transformación comienza con el almacenado y secado de las planchas en el patio de la industria preparadora. El objetivo del secado es estabilizar la materia prima y relajar sus tensiones internas, mejorando las características tecnológicas de la materia prima y la calidad de los productos terminados (GARCÍA ET AL., 1996; COSTA & PEREIRA, 2013). El secado natural, en el que el aire es el agente secante, está regulado por el Código Internacional de Prácticas Taponeras (CIPT) elaborado por la Confederación Europea de Empresas Corcheras (CE LIÈGE, 2006), quien establece un periodo mínimo de secado de seis meses.

La humedad del corcho en pie o recién extraído varía entre el 15 y 40 % (GIL, 1998; PEREIRA, 2007), disminuyendo rápidamente en contacto con el aire hasta alcanzar el 14%, humedad correspondiente al corcho comercialmente seco (normas UNE 56-915-88 1998; ISO 1216 1998), en un periodo de 8 a 15 días (ROBLEDANO ET AL., 2009; COSTA & PEREIRA, 2013). Las planchas se trasladan a la industria, donde se apilan y tras varios meses al aire alcanzan la humedad de equilibrio higroscópico dependiendo de las condiciones ambientales del entorno y su composición química. La humedad de equilibrio higroscópico para humedades relativas comprendidas entre 50 y 80%, varía entre el 7 y 10

% a 20°C de temperatura ambiental (GONZÁLEZ-ADRADOS & CALVO HARO, 1994) y entre 6 y 8% a 30°C (GIL & CORTIÇO, 1998). Una vez estabilizadas, las planchas se someten a una cocción en agua a 100°C durante una hora aproximadamente, originándose modificaciones anatómicas y químicas (ROSA ET AL., 1990).

En la actualidad, el 100% del corcho se seca al aire y no se conocen experiencias previas a escala industrial o de laboratorio en que se haya aplicado el secado artificial a las planchas de corcho. Existen estudios sobre su comportamiento frente a tratamientos de calor a temperaturas que oscilan entre 100 y 450°C, hasta la completa carbonización del corcho, así como de los cambios físicos y químicos que experimenta y su influencia en las propiedades mecánicas (ROSA & FORTES, 1988; CORDEIRO ET AL., 1998; PEREIRA, 1992). Sin embargo, no se conoce la influencia del secado artificial en las características tecnológicas de las planchas, entre las que tienen especial relevancia el calibre, la calidad, el color, el coeficiente de porosidad y el comportamiento a compresión.

El calibre, o espesor de la plancha, influye significativamente en la calidad y en las propiedades mecánicas del corcho condicionando el tipo de producto final que se fabrica (PEREIRA, 1998). La variación del contenido de humedad produce variaciones dimensionales, especialmente significativas en la dirección radial, correspondiente al calibre (ROSA ET AL., 1990; CUMBRE ET AL., 2000).

La calidad, que influye sobre el rendimiento, se determina mediante el método tradicional de inspección visual, donde las planchas se evalúan en función del calibre y una serie de factores derivados de la respuesta de la corteza a las condiciones ambientales y de la actuación de agentes bióticos (GARCÍA DE CECA ET AL., 2000). El número de clases de calidad varía entre las 9 clases establecidas por las agencias oficiales en Andalucía y Extremadura (SACA, 2010; ICMC, 2010) y las 4 ó 5 empleadas habitualmente en la industria. Uno de los factores que determinan el aspecto visual y el cual podría verse alterado durante el secado es el color.

La porosidad es un factor determinante en la calidad del corcho y hace referencia a la presencia de canales lenticulares que atraviesan las planchas radialmente (GONZÁLEZ-ADRADOS ET AL., 2000). Se evalúa mediante el coeficiente de porosidad, que presenta valores que oscilan entre 1.1 y 18.9% en la dirección tangencial y entre 2.1 y 16.4 % en las direcciones transversal y radial (PEREIRA, 2007). La porosidad puede medirse con técnicas de análisis de imagen (LOPES & PEREIRA, 2000; COSTA & PEREIRA, 2007) y espectroscopía en el infrarrojo cercano (PRADES ET AL., 2010), mejorando considerablemente los resultados cuando las clases de calidad se reducen a tres (COSTA & PEREIRA, 2005, 2006).

Una de las propiedades fundamentales del corcho para la función de tapamiento es su gran elasticidad. La aplicación de grandes cargas a compresión origina la compactación de la estructura celular y su densificación, produciendo deformaciones del 80-85% sin llegar a la rotura (ROSA & FORTES, 1988; ROSA ET AL., 1990; PEREIRA ET AL., 1992). Cuando cesa el esfuerzo de compresión, el corcho recupera de manera instantánea el 70 % de la geometría inicial, alcanzando la recuperación diferida el 3% para deformaciones iniciales de compresión de 30% y valores que oscilan entre 6 y 11% cuando la deformación inicial ha sido del 80% (PEREIRA, 2007). Al ser el corcho un material anisótropo, sus propiedades varían en función de la dirección de aplicación de la carga, siendo la resistencia a compresión mayor en dirección radial (PEREIRA, 2007; ANJOS ET AL., 2008). Se establece una relación directa entre resistencia a compresión y densidad, sin embargo la influencia de la calidad y la porosidad no son significativas (ANJOS ET AL., 1997, 2008).

En la actualidad, la industria del corcho se enfrenta a distintos retos entre los que se encuentran la mejora de la calidad, necesidad de innovar, mejora de la industrialización de los productos del corcho, reducción de costes y el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación, para competir con otros productos de tapamiento. La introducción de técnicas de secado artificial al corcho en plancha en la industria supondría la disminución de los tiempos de secado, del coste de inmovilizado de la materia

prima y de las necesidades de espacio en la industria, y facilitaría la adaptación de las industrias del corcho de primera transformación a la demanda del mercado.

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar un primer estudio de viabilidad para analizar las posibilidades de la aplicación de técnicas de secado artificial al corcho en plancha, en cámara y a temperaturas inferiores a 100°C. La influencia del secado en la competencia de la materia prima para producir de forma eficiente tapones de corcho natural, se evalúa mediante el análisis comparativo entre los métodos de secado natural y al aire, a través de las variables que mayor influencia tienen en las características tecnológicas de las planchas.

## 3. Metodología

Se ha diseñado y aplicado un método de secado de planchas de corcho crudo en cámara mediante aire caliente climatizado a temperatura inferior a 80°C. El método propuesto se ha comparado con el sistema de secado natural al aire según la práctica tradicional, realizando para ello el seguimiento de la humedad y estudiando el comportamiento de las planchas en relación a las variables más significativas desde el punto de vista de la posterior transformación en tapón.

### 3.1. Material experimental

Las planchas de corcho fueron proporcionadas por La Almoraima SA (Cádiz) de la temporada de cosecha 2009 y seleccionadas de manera aleatoria después de su extracción del árbol. El colectivo de muestras estaba compuesto por 65 planchas de corcho, transportadas a Córdoba para su procesado. Sus dimensiones oscilaban entre 60-120 cm en dirección longitudinal y entre 20-45 cm en dirección transversal. Cada plancha se dividió en dos sub-planchas (A y B) en dirección axial. A cada sub-plancha se le realizaron dos cortes transversales y paralelos en la zona superior e inferior obteniéndose 2 recortes de cada una (RAa, RAb, RBa y RBb) (figura 1a). Una vez recortadas, las sub-planchas se secaron según los dos procedimientos: el colectivo A se secó al aire libre siguiendo el procedimiento tradicional y el secado del colectivo B se realizó en cámara de manera forzada.

Tras el secado, de cada sub-plancha se obtuvieron dos conjuntos de muestras denominadas probetas y calas. Las calas tienen un tamaño de 10 cm x 10 cm y se extrajeron de la parte superior derecha de la sub-plancha A (CA) y de la parte superior izquierda de las sub-plancha B (CB), de forma que fueran complementarias. Las probetas tienen un tamaño de 5 cm x 5 cm, y se extrajeron a 10 cm de la parte superior siguiendo el criterio anterior, a la derecha en la sub-plancha A (PA) y a la izquierda en la sub-plancha B (PB) (figura 1b).

Los recortes se utilizaron para el cálculo de la humedad inicial de las sub-planchas. Las sub-planchas se usaron para el seguimiento del contenido de humedad y la medición del calibre, las calas para estudiar la calidad industrial, el color y el coeficiente de porosidad y las probetas para estudiar el comportamiento a compresión.

Los equipos empleados fueron dos balanzas Gram precisión (modelo DM-1100 y ADW-15KG, de 0.1g y 5g de precisión respectivamente), estufa de desecación (Indelab IDL AI-80), calibrador Vernier Mitutoyo (precisión de 0.05mm), sierra de calar convencional (Black & Deccker), sierra circular (Emco Swing), escáner (Hp Photosmart C4180), cámara climática (Dycometal CCK 81), máquina de ensayos electromecánica (modelo ELIB-10/W, con una precisión de  $\pm 1\%$ ) y cámara de secado (modelo MRSR S7OP7-720SM). La cámara de secado dispone de un sistema de circulación del aire compuesto por 2

ventiladores de tipo helicoidal, un sistema de calefacción mediante una batería de radiadores y un sistema de humidificación del aire constituido por inyectores de agua fría pulverizada.

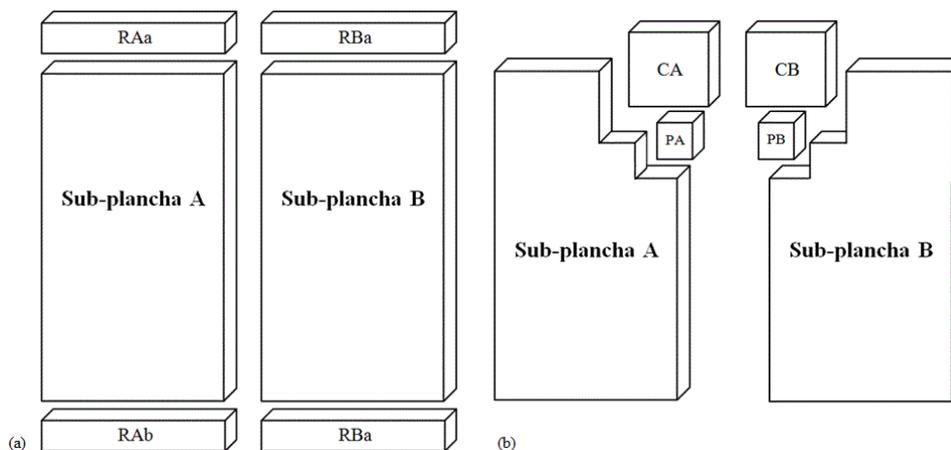


Figura1. División de planchas de corcho de tamaño comercial. (a) Extracción de sub-planchas A y B y recortes RAa, RAb, RBa y RBb. (b) Extracción de las muestras: calas CA y CB de tamaño 10 cm x 10 cm y probetas PA y PB de tamaño 5 cm x 5 cm.

### 3.2. Práctica del secado

#### 3.2.1. Secado natural al aire

En el secado a la intemperie, el aire es el agente secante, de forma que las condiciones climáticas como la temperatura del aire, la humedad y la velocidad del viento influyen en el secado de la pila de corcho, acelerando o ralentizando dicho proceso (COSTA ET AL., 2013). En este trabajo se ha considerado la influencia de las precipitaciones con datos registrados en la Estación Meteorológica más cercana al lugar de ensayo (Córdoba), perteneciente a la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía (IFAPA, 2010). El colectivo A se ha sometido al secado natural al aire libre durante seis meses, siguiendo el proceso operativo recogido en el CIPT (CE LIÈGE, 2006). Las planchas se dispusieron formando una pila rectangular (2.1 m x 1.2 m x 0.8 m aproximadamente y un volumen de 1-1.2m<sup>3</sup>), con la longitud perpendicular al viento dominante y con la altura suficiente para eliminar el contacto con el suelo, facilitando la circulación del aire y la salida del agua.

#### 3.2.2. Secado artificial en cámara mediante aire caliente climatizado a temperatura media

Las sub-planchas del colectivo B se han secado artificialmente en cámara mediante aire caliente climatizado a temperatura media ( $\leq 80^{\circ}\text{C}$ ). Las planchas se almacenaron dentro de la cámara siguiendo el mismo criterio usado en el secado al aire libre, formando una pila de dimensiones y volumen similares. Dado que no hay experiencias previas en corcho, se han tomado como referencia los programas de secado utilizados habitualmente para las especies de madera en España. Considerando las propiedades físicas de densidad y permeabilidad del material y teniendo en cuenta que el corcho no va a experimentar contracciones significativas durante el proceso, se ha seleccionado el programa más agresivo, recomendado para el secado de coníferas (FERNÁNDEZ-GOLFÍN ET AL., 2007). La cédula de secado estaba formada por 7 etapas de 48 horas de duración cada una de ellas. Las condiciones de temperatura y humedad relativa en cada etapa han sido las siguientes: etapa 1 (65°C, 85%), etapa 2 (65°C, 75%), etapa 3 (65°C, 65%), etapa 4 (70°C, 55%), etapa 5 (70°C, 52%), etapa 6 (75°C, 48%) y etapa 7 (80°C, 40%). La velocidad del aire se ha considerado constante durante la cédula de secado, con un valor de 30 Km/h.

### 3.3. Métodos de referencia para la determinación de los parámetros comparativos

3.3.1. *Humedad*: El contenido de humedad de las muestras ( $H_o$ ) se ha determinado según la norma UNE-56-913-88 y la siguiente ecuación:

$$H_o = \frac{M_h - M_o}{M_o}$$

donde  $H_o$  (%) es el contenido de humedad en base seca;  $M_h$  es la masa húmeda del material; y  $M_o$  es la masa seca del material.

La humedad inicial de las sub-planchas se asimiló a la humedad inicial media de los dos recortes obtenidos de cada una. Para el seguimiento temporal de la humedad del colectivo secado al aire se realizaron pesadas cada 16 días de todas las sub-planchas A durante los 6 meses en que permanecieron apiladas. Para el seguimiento temporal de la humedad del colectivo secado en cámara se seleccionó un lote de 10 sub-planchas B (representativas de la variabilidad dentro del colectivo) que se pesaron a la finalización de cada etapa.

3.3.2. *Calibre*: El calibre medio se midió en el centro de las caras transversales de las sub-planchas A y B. Para el seguimiento temporal del calibre del colectivo A, se realizaron mediciones sucesivas cada 16 días de todas las sub-planchas durante el periodo de 6 meses. Para el seguimiento del calibre del colectivo B, se midió el calibre al finalizar cada etapa de secado en el mismo lote utilizado para la medición de la humedad.

3.3.3. *Calidad*: La calidad del corcho se ha determinado según el método tradicional de inspección visual tras el secado en una clasificación de 9 clases (1-8, de mejor a peor calidad; 9, correspondiente al refugo o corcho no apto para fabricar tapón o disco natural) (ICMC, 2010) de las calas CA y CB (figura 1b). El corcho fue clasificado por un único operador altamente experimentado del Instituto del Corcho, la Madera y el Carbón Vegetal (ICMC).

3.3.4 *Compresión*: Se ha realizado el ensayo de compresión a las probetas PA y PB (figura 1b), obtenidas después del secado y acondicionadas en cámara climática a 23°C de temperatura y 50% de humedad relativa hasta su estabilización. Para ello se ha usado la máquina electromecánica ELIB-10/W controlada por ordenador y con adquisición de datos a través del Software Wintest-32. La compresión se realizó en sentido radial con el objetivo de que no influyera la raspa y aplicando una fuerza de 10-10,5 kN a velocidad uniforme de 0.5 kN/s, obteniéndose la curva de tensión-deformación para cada probeta ensayada.

3.3.5. *Color y coeficiente de porosidad*: Con el fin de analizar posibles cambios de coloración y de porosidad en las planchas, se ha aplicado una metodología basada en el análisis colorimétrico de imágenes de alta resolución (600 ppp) de la sección radial completa de las calas CA y CB (figura 1b), previamente secadas al aire y en cámara, mediante el escaneo de las mismas (PRADES ET AL., 2010). El escáner realiza un barrido superficial de la imagen para obtener una matriz bidimensional que contiene el código de coordenadas de color para cada uno de los píxeles en los que ha resultado teselada la imagen. Cada pixel tendrá asociada dos coordenadas espaciales y las de color, expresadas como superposición de tres colores: rojo (coordenada R), verde (coordenada G) y azul (coordenada B) (DI ZENZO, 1983). Debido a los errores sistemáticos de los escáneres cuando se estiman las coordenadas RGB, el software se ha calibrado mediante escaneado de tablas colorimétricas certificadas (tablas de Munsell) y se han obtenido ecuaciones de correlación entre los valores colorimétricos Munsell y los obtenidos por el escáner por el método de mínimos cuadrados.

La porosidad se ha medido mediante el coeficiente de porosidad (CP), que se define como el porcentaje de área no ocupada por tejido típico suberoso. Para calcular el coeficiente de porosidad se

determinaron las superficies asociadas a poros dentro de la imagen, mediante el método de las K-medias, algoritmo de segmentación que divide una serie de datos en grupos con características similares (WU & YANG, 2002).

### **3.4. Análisis de datos y tratamiento estadístico**

Las características tecnológicas de cada colectivo se evaluaron y compararon asumiendo la hipótesis de que las muestras de una misma plancha tenían idénticas propiedades iniciales. Se han descrito los resultados obtenidos para cada variable y se ha comprobado si hay diferencias significativas entre ambos sistemas de secado mediante la prueba estadística indicada en cada caso.

Para los parámetros de contenido de humedad, calibre, fuerza de compresión y coeficiente de porosidad, se empleó el test *t* de comparación de medias con muestras relacionadas (MENDENHALL, 1979). Con respecto al ensayo de compresión, se han calculado las diferencias relativas de tensión entre cada par de probetas (PA y PB) y se ha obtenido una curva media representativa del colectivo muestral completo. Si no hay diferencias entre ambos métodos de secado, esta curva media coincidiría con el eje X, por lo que se han utilizado nuevos contrastes de comparación de medias para datos relacionados, con el fin de ver si hay diferencias significativas entre los valores medios de tensión por ambos métodos de secado, para varios valores de deformación.

La calidad de los colectivos de calas (CA y CB) se ha comparado mediante una tabla de doble entrada donde se calculan las frecuencias de parejas de calas en las que hay coincidencia en la clasificación y las que presentan variación de una, dos o más categorías. Debido al alto grado de subjetividad que incorpora esta clasificación (GARGÍA DE CECA ET AL., 2000) las diferencias observadas pueden deberse a diferencias reales de calidad o pueden achacarse a que el clasificador no siempre clasifica la misma muestra en la misma clase. Para hacer esta comprobación se ha realizado la prueba de McNemar-Bowker (BOWKER, 1948), test basado en la simetría de la tabla de contingencia: si las diferencias observadas a ambos lados de la diagonal principal son similares, implicaría que el clasificador tiene idéntica probabilidad de equivocarse y se acepta que la calidad sería la misma en ambos procedimientos de secado.

Para comparar la coloración de las muestras obtenidas, se han estimado los valores RGB medios representativos de los colectivos A y B. Mediante la prueba estadística multivariante de Hotelling (KENDALL, 1975), se han analizado las diferencias medias entre las variables multivariantes (componentes R, G y B) de cada pareja de calas A y B procedentes de una misma plancha.

## **4. Resultados**

### **4.1. Humedad de los colectivos de sub-planchas A y B**

El contenido de humedad inicial de las 65 sub-planchas A y B es 8.47% y 7.88 % respectivamente con desviaciones típicas de 1.55% y 1.15 % (tabla 1). La elevada variabilidad de la humedad de ambos colectivos (mínimo 5.56% - máximo 13.69%), con similares procedencias y condiciones ambientales, pone de manifiesto la enorme heterogeneidad del corcho, consecuencia de su composición química y la distribución irregular de los canales lenticulares. Esta variabilidad se produce entre las planchas y entre los recortes procedentes de la misma plancha, coincidiendo con PEREIRA (2007).

La evolución de la humedad del colectivo A, secado al aire libre, estuvo condicionada por el clima local. La curva de humedad media y la curva de precipitaciones registrada en ese periodo (figura 2a), guardan una relación significativa de acuerdo con el coeficiente de correlación de Pearson ( $r = 0.882$ ,

$p < 0.001$ ). A partir de la humedad media inicial (8.47%), las sub-planchas A alcanzaron un valor máximo de 37.2% en la segunda medición, que se corresponde con la máxima precipitación (256 mm) recogida entre la primera y la segunda medición. La humedad disminuyó en las etapas posteriores hasta alcanzar 9.33% el día 128. El último pico de contenido de humedad (20.81% el día 144) se debe al hecho de que más del 50% de la precipitación acumulada en el período (22.3 mm) ocurrió 2 días antes de la fecha de medición. Entre los días 144 y 160 el contenido de humedad se redujo a 4.88% debido a la baja precipitación (4.2 mm), un aumento de la temperatura media de 3 °C y una disminución del 8% en la humedad relativa media durante este período. El contenido de humedad del colectivo A fue del 3.18% después de 6 meses de secado y estabilización al aire libre (tabla 1). Los resultados del test  $t$  de comparación de medias para muestras relacionadas ( $t = 26.709$ ;  $p < 0.001$ ) demuestran una variación significativa de humedad en el proceso de secado.

Tabla 1. Estadísticas básicas del contenido de humedad en base seca (%), calibre medio del corcho (mm) y coeficiente de porosidad (%). Valores de los colectivos A y B antes y después del secado.

	<i>n</i>	<i>Media</i>	$\sigma$	<i>Max.</i>	<i>Min.</i>	<i>C.V.</i>
<b><i>Humedad en base seca (%)</i></b>						
Colectivo A						
<i>Antes</i>	65	8.47	1.55	13.69	6.57	0.18
<i>Después</i>	65	3.18	1.56	9.43	0.70	0.49
Colectivo B						
<i>Antes</i>	65	7.88	1.15	11.91	5.56	0.15
<i>Después</i>	65	2.54	1.10	5.38	0.36	0.43
<b><i>Calibre medio (mm)</i></b>						
Colectivo A						
<i>Antes</i>	65	32.1	6.0	52.0	20.4	0.19
<i>Después</i>	65	32.8	6.1	53.0	20.5	0.19
Colectivo B						
<i>Antes</i>	65	31.7	5.7	43.2	19.5	0.18
<i>Después</i>	65	32.9	5.8	44.3	20.5	0.18
<b><i>Coefficiente de porosidad (%)</i></b>						
Colectivo A						
<i>Después</i>	57	31.45	5.92	42.38	17.61	0.19
Colectivo B						
<i>Después</i>	57	31.87	5.62	43.83	19.04	0.18

\* $\sigma$ : desviación estándar; C.V: coeficiente de variación

La curva de humedad media del secado artificial en cámara de las 10 sub-planchas seleccionadas del colectivo B refleja un aumento brusco al final de la primera etapa, desde 8.13% a 13.08%, como consecuencia de la humectación de la cámara mediante el empleo de inyectores que rocían agua fría. El contenido de humedad descendió de forma paulatina hasta alcanzar un valor mínimo de 2.82% (figura 2b). La humedad media del colectivo B antes de secado (7.88%) se redujo al 2.54% (tabla 1), por lo que el tratamiento de secado en cámara y el sometimiento de las muestras de corcho a una

temperatura de 80°C resulta efectivo en términos de valores de humedad, de acuerdo con la prueba  $t$  de comparación de medias para muestras relacionadas ( $t = 37.819$ ;  $p < 0.001$ ).

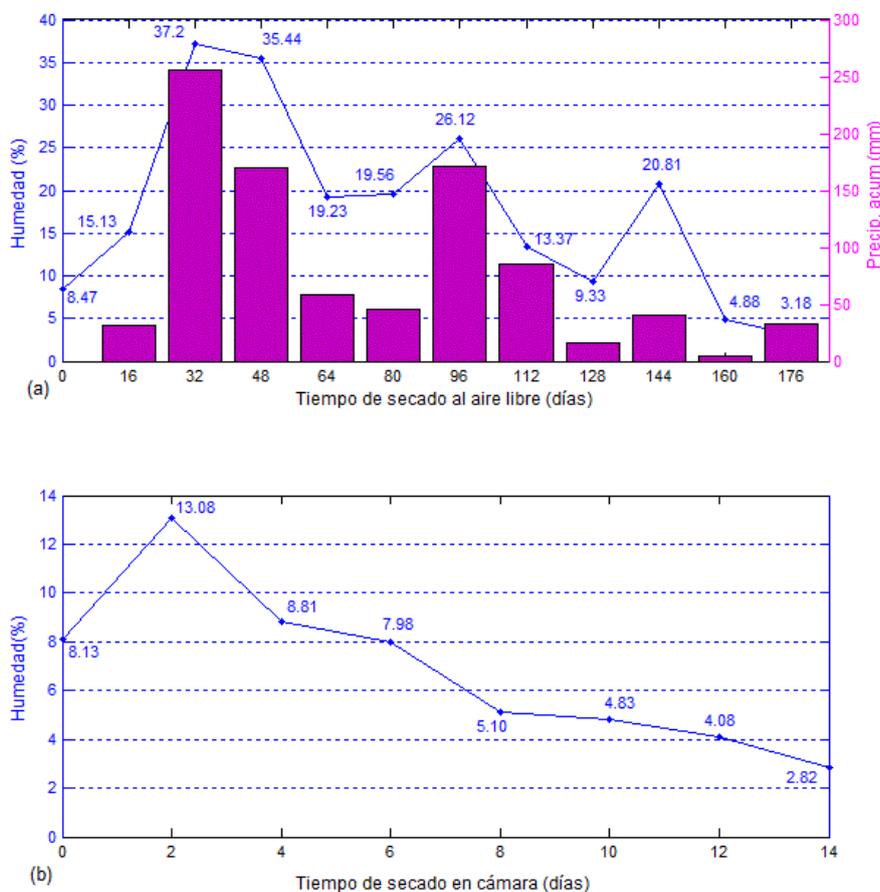


Figura 2. Curvas de humedad media (%) de las planchas de corcho durante el secado. (a) Curva de humedad media (%) del colectivo A y valores de precipitación acumulada, expresados en mm, recogidos por la Estación Meteorológica de Córdoba (perteneciente a la Red de Estaciones Agroclimáticas de Andalucía) y representados entre mediciones. (b) Curva de humedad media (%) del colectivo B secado en cámara.

La reducción del contenido de humedad con ambos métodos de secado fue similar (5.29 % en el colectivo A y 5.34 % en el B) según la prueba  $t$  de comparación de medias para muestras relacionadas ( $t = -0.183$ ;  $p = 0.855$ ) (tabla 1). La desviación típica, y por tanto, la variabilidad en el contenido de humedad, se ha mantenido prácticamente constante antes y después de secado (1.55% y 1.56% en el colectivo A y 1.15% y 1.10% en el B) (tabla 1). Esto pone de manifiesto que las muestras de corcho se secan de manera desigual a pesar de las condiciones homogéneas que se mantienen en la cámara, al igual que ocurre en el secado tradicional al aire libre.

#### 4.2. Calibre

Los valores de calibre inicial muestran una alta variabilidad, con desviaciones típicas de 6.0mm y 5.7mm en los colectivos A y B respectivamente (tabla 1). En los procesos de secado artificial y a la intemperie, las muestras se sometieron a ciclos de humectación y secado, produciéndose un importante aumento de calibre durante la humectación y una disminución de calibre durante la fase de secado, más lenta (figuras 3a y 3b). En el secado al aire, después de 6 meses de reposo, el aumento de calibre medio fue del 2%, estadísticamente significativo según la prueba de comparación

de medias ( $t = -10.560$ ;  $p < 0.001$ ). En el secado artificial, tras 14 días en cámara, el aumento medio de calibre fue del 3.64%, siendo asimismo significativo ( $t = -11.721$ ;  $p < 0.001$ ) (tabla 1). Las diferencias entre los aumentos medios de calibre por ambos métodos, también son significativas ( $t = -4.2$ ;  $p < 0.001$ ).

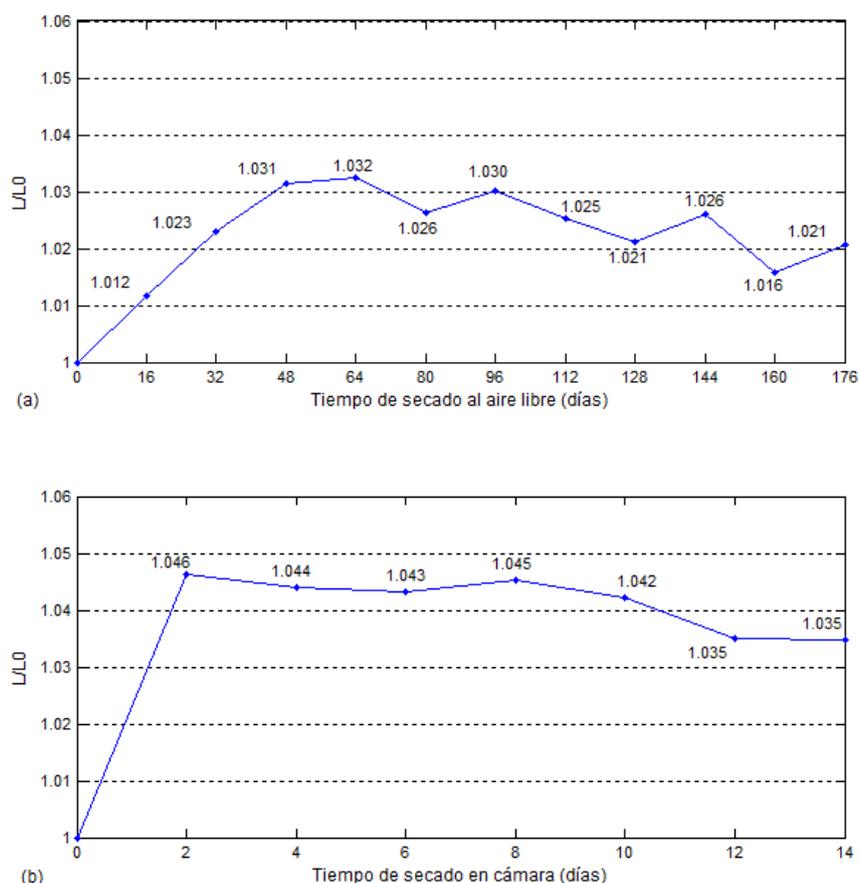


Figura 3. Variación de calibre medio (L/LO) durante el secado. (a) Variación en el colectivo A durante el secado a la intemperie. (b) Variación en el lote seleccionado del colectivo B durante cada fase de secado en la cámara.

### 4.3. Calidad

La clasificación de calidad según el método tradicional de las 60 calas CA y las 60 calas CB, mostró que el porcentaje de muestras clasificadas en las tres clases de mayor calidad coincidía para ambos colectivos (5%, 12% y 8%, para las clases 1, 2 y 3 respectivamente). Sin embargo, se produjeron variaciones en las clases intermedias e inferiores debido a la influencia del operador, que se acentuó en las clases de calidad media (BARROS & PEREIRA, 1987). En la clase 4, se clasificó un 20 % de las calas CA y un 17 % de las calas CB, siendo ese porcentaje para el refugio del 25 % (calas CA) y 32% (calas CB) (tabla 2).

La prueba de McNemar-Bowker no mostró diferencias significativas ( $p = 0.478$ ) entre ambos métodos de secado. Esto indica que las variaciones en la clasificación pueden deberse a la valoración subjetiva del clasificador (BARROS & PEREIRA, 1987; LOPES & PEREIRA, 1997), ya que las frecuencias en las celdas que no están en la diagonal principal de la matriz, presentan simetría en ambos sentidos (tabla 2).

Tabla 2. Frecuencias absolutas de pares de muestras PA y PB que solaparon en la clasificación para cada tipo de secado, según el método de clasificación tradicional.

	Clases de calidad de calas B									Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Clases de calidad de calas A	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	3
	2	2	2	2	0	0	0	0	0	1	7
	3	0	1	2	0	1	0	0	0	1	5
	4	0	2	0	5	3	0	1	0	1	12
	5	0	0	0	3	0	0	1	0	0	4
	6	0	0	0	1	1	2	1	0	2	7
	7	0	0	0	0	1	0	1	0	3	5
	8	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2
	9	0	1	0	1	2	0	0	0	11	15
Total	3	7	5	10	8	3	4	1	19	60	

#### 4.4. Ensayo de compresión

La curva de tensión-deformación media obtenida del ensayo de compresión de las 57 probetas de cada colectivo A y B (figura 4a) muestra, en términos generales, una primera región prácticamente lineal, hasta una deformación del 10% para una carga de 0.5 Mpa, un aumento progresivo de la deformación hasta el 40% aproximadamente para una carga de 2 Mpa, alcanzándose deformaciones por encima del 60% para cargas de 3.5MPa, coincidiendo con PEREIRA (2007).

Las diferencias relativas de tensión correspondientes a las probetas A y B, en función de la deformación, presentan una diferencia sistemática que permanece más o menos estable en el intervalo de deformación del 10 al 55% (figura 4b). Es decir, para obtener una misma deformación hay que aplicar entre un 7% y un 9% más de tensión, aproximadamente, en el caso del corcho secado al aire libre (probetas A) frente al secado en cámara (probetas B). A partir de dicha deformación, la diferencia relativa de tensión disminuye gradualmente hasta acercarse a cero.

Para analizar si la diferencia de comportamiento de ambos colectivos es significativa o se puede achacar al proceso de muestreo, se ha realizado un conjunto de test de diferencias de medias de tensión para muestras relacionadas en función del valor de deformación. El resultado muestra que para un nivel de significación del 1% ninguna diferencia es significativa y, únicamente, para un nivel de significación del 5% y valores de deformación comprendidos entre el 26% y 54% pueden encontrarse diferencias (tabla 3).

#### 4.5. Coloración

El análisis de coloración llevado a cabo sobre 57 calas A (CA) y 57 calas B (CB), muestra una composición media RGB del colectivo A de 190.6 – 143.8 – 115.6 y del colectivo B de 189.6 – 141 – 114, muy similares entre sí y en la línea de los resultados de PEREIRA (2007).

El resultado del test de Hotelling ( $T^2 = 48.775$ ;  $p < 0.001$ ) indica que hay diferencias estadísticamente significativas en cuanto a coloración media. Sin embargo, no hay evidencias suficientes para afirmar que estas diferencias son claramente detectables por el ojo humano.

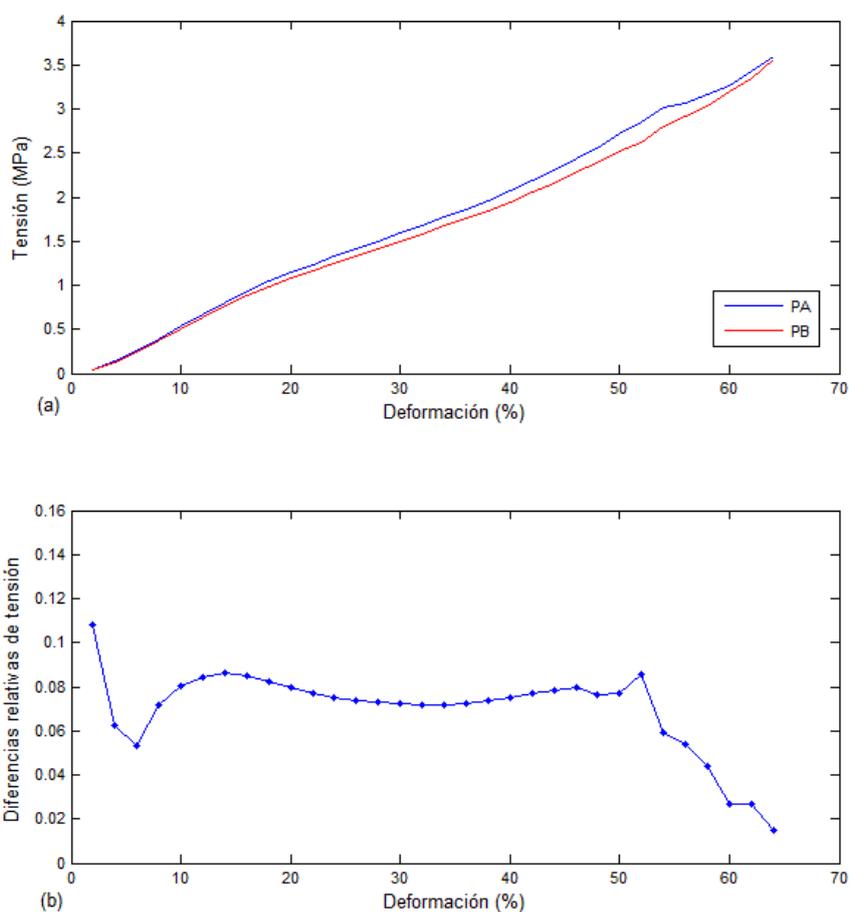


Figura 4. Ensayo de compresión de las planchas de corcho. (a) Curvas medias de tensión-deformación de las probetas A y B. (b) Diferencias en las curvas medias de tensión-deformación de las probetas A y B.

Tabla 3. Test de diferencias de medias de tensión para muestras relacionadas en función del valor de deformación usando ambos métodos de secado.

Deformación	n	media	$\sigma$	$T_{exp}$	p-valor
2	60	0.11	0.61	1.38	0.086
10	60	0.08	0.55	1.13	0.132
20	60	0.08	0.38	1.62	0.055
30	60	0.07	0.32	1.72	0.045
40	60	0.08	0.31	1.88	0.033
50	58	0.08	0.30	1.94	0.029
60	34	0.03	0.21	0.75	0.230

#### 4.6. Coeficiente de Porosidad

El coeficiente de porosidad, determinado a partir de 57 calas de cada colectivo (CA y CB) después del proceso de secado, presenta un valor medio de 31.45% para el secado al aire y 31.87% para el secado en cámara (tabla 1). La variabilidad fue alta dentro de cada colectivo, con valores de desviación típica de 5.92% y 5.62% respectivamente. La prueba *t* de comparación de medias para muestras relacionadas ( $t = -0.419$  y  $p = 0.677$ ) indica que no hay diferencias significativas en el coeficiente de porosidad medio, entre muestras procedentes de ambos tipo de secado.

### 5. Discusión

El contenido de humedad de las planchas de corcho después de la extracción del árbol osciló entre el 15% y el 40%, cuando comenzó el proceso de pérdida de agua. En la fase inicial, el agua libre se evapora y el corcho pierde alrededor del 50-70% del agua que contiene hasta alcanzar la humedad comercial del 14% en 9-15 días (GIL, 1998; PEREIRA, 2007; ROBLEDANO ET AL., 2009). En esta fase, la pérdida de humedad se produce muy rápidamente y el ratio de secado (variación del contenido de humedad diario) es superior al -1% por día.

A medida que avanza el proceso de secado, el agua unida a las capas más superficiales comienza a difundirse y evaporarse y la pérdida de agua se ralentiza. Este efecto se agrava a medida que el fenómeno se internaliza y el ratio de secado disminuye progresivamente (ROSA & FORTES, 1993; GONZÁLEZ-ADRADOS & CALVO HARO, 1994; COSTA & PEREIRA, 2013). En el colectivo de sub-planchas A, que presentaba una humedad inicial y final de 8.47% y 3.18% respectivamente, el ratio de secado al aire varió de -0.09% a -1.01% durante los ciclos de pérdida de humedad y de +0.02% a +1.37% durante los ciclos de ganancia de humedad dependiendo de las condiciones ambientales. Hubo ciclos alternos de pérdida y ganancia de humedad durante los once períodos de 14 días, cuando las planchas permanecieron al aire libre. En el colectivo de sub-planchas B, secado en cámara, hubo un ciclo inicial de 2 días en el que el contenido de humedad aumentó +2.48%. A esto siguió un ciclo de pérdida de humedad con una relación de secado de -0.85%, que continuó hasta el final del ciclo de 14 días.

Dadas las fases del proceso de secado, podría considerarse una combinación de los dos métodos en los que las planchas de corcho se secan primero al aire hasta alcanzar el contenido de humedad comercial y luego en cámara hasta alcanzar el contenido de humedad final deseado. La optimización del proceso de secado en cámara requiere un análisis más profundo de la relación entre temperatura, humedad relativa y velocidad del aire y el movimiento del agua en el corcho (evaporación superficial, evaporación interna y difusión) para establecer el ratio de secado adecuado.

En vista de los resultados, se debe considerar si el corcho puede ser sometido a programas de secado más agresivos con temperaturas finales superiores a 85 °C, acortando aún más el período de secado. Para el secado del corcho verde se han utilizado programas de dos semanas con una temperatura final de 80 °C y programas de 96 h de duración con una temperatura final de 90 °C (PEREIRA, 2007). En madera, la velocidad del aire de secado es importante en las primeras etapas cuando la pérdida de agua es muy alta y funciona como agente homogeneizador del contenido de humedad dentro de la cámara (PRATT ET AL., 2010). Sin embargo, cuando el corcho se seca en cámara, se pierde mucha menos agua que en la madera, y cuando el corcho se seca al aire, la velocidad del aire no parece afectar mucho el proceso (MAGALHAES & PINHO, 2008). Por lo tanto, el papel de este agente (30 km/h en este caso) sería asegurar un secado homogéneo entre las pilas y en las diferentes partes de una pila. El papel del tercer agente, la humedad relativa, puede estar relacionado con la conveniencia de reproducir los ciclos de humectación y secado que se producen cuando las planchas se apilan al aire libre, disminuyendo así las tensiones internas en las células y capas de corcho, aunque esta relación no ha sido probada científicamente (PEREIRA, 2007).

Aunque este estudio de viabilidad presenta los resultados de un primer experimento realizado, no se han detectado efectos indeseables en el corcho. El sometimiento de las planchas a las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del aire establecidas en el programa de secado no alteró las características del corcho ni provocó tensión en las planchas, lo que indica que el programa aplicado en este estudio podría ser cercano al óptimo.

Tanto en el sistema de secado tradicional como en el artificial, las muestras sufrieron un importante aumento de calibre de forma rápida tras una humectación inicial, disminuyendo progresivamente a medida que avanzó el proceso de secado. Al finalizar el periodo de secado, el aumento de calibre fue significativo para ambos métodos, apreciándose diferencias significativas entre los aumentos medios de ambos métodos, siendo mayores para el secado en cámara. El aumento de calibre alcanzado con el secado en cámara podría ser beneficioso para la industria del corcho, ya que aumentaría el porcentaje de corcho adecuado para la fabricación de tapones de corcho natural. De acuerdo con nuestros resultados, para obtener una plancha de 27 mm (calibre requerido para producir un tapón estándar de 24 mm), la diferencia entre el aumento de calibre por ambos métodos (2% para secado al aire y 3.64% para secado en cámara) debe de ser inferior a 0.5mm. Sin embargo, el mayor aumento de calibre (alrededor del 20%) ocurre durante un tratamiento posterior en el que el corcho se hierve (FORTES & ROSA, 1988). Por lo tanto, sería necesario probar el efecto acumulativo de ambos procesos (secado en cámara y cocción) sobre el grosor de la plancha.

Las diferencias relativas entre tensión/deformación son muy similares en los valores centrales: son muy grandes para valores de deformación por debajo del 10% y muy pequeños para valores de deformación superiores al 55%. Por lo tanto, el comportamiento de las planchas secadas en cámara permanece constante en el rango de 0,5-3 MPa y para deformaciones entre 10% y 55%, en línea con ROSA & FORTES (1988). Si se confirma que las características tecnológicas del corcho secado en cámara son comparables o mejores que las características tecnológicas del corcho secado al aire, el corcho apto para la transformación industrial podría obtenerse en un plazo inferior al período de 6 meses recomendado en el CIPT para la correcta estabilización de la materia prima.

Las desventajas del secado en cámara son la mayor inversión requerida y un mayor consumo de energía. Las principales ventajas son que el proceso no se ve afectado por las condiciones meteorológicas y se necesita menos tiempo para obtener planchas de corcho con el contenido de humedad final deseado. El secado en cámara también evita problemas de contaminación del suelo y crecimiento de microorganismos en el corcho, al tiempo que mejora el control sobre las características tecnológicas de la materia prima. Se necesitaría un análisis económico y financiero para evaluar las ventajas y desventajas de este método, teniendo en cuenta su influencia sobre la materia prima a secar.

## 6. Conclusiones

La reducción en el contenido de humedad mediante secado tradicional al aire libre durante un periodo de seis meses, ha sido similar a la reducción del contenido de humedad mediante secado artificial en cámara durante 14 días. No se han encontrado diferencias significativas entre los parámetros tecnológicos utilizados para comparar ambos métodos (calidad, compresión, color, coeficiente de porosidad), a excepción del calibre, resultando un mayor incremento por el método artificial.

En resumen, este estudio de viabilidad concluye que el secado en cámara puede considerarse una técnica apta para su aplicación al corcho en plancha, reduciendo de manera importante el tiempo de secado y los costes de inmovilizado de la materia prima. La aplicación de esta técnica constituiría una innovación en el proceso de transformación ya que permite controlar las variables climáticas que afectan al proceso de secado y mejorar el control sobre las características tecnológicas de la materia

prima. Las futuras investigaciones sobre la aplicación de técnicas de secado artificial al corcho en plancha, deberían ampliar el estudio a colectivos más amplios y diferentes programas de secado, así como realizar una evaluación económica y financiera del método.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de La Almoraima S.A. (Cádiz) por proporcionar las planchas de corcho y del ICMC (Junta de Extremadura) por su contribución en la clasificación de las planchas. También expresamos nuestro agradecimiento al profesor José Ramón González-Adrados de la Universidad Politécnica de Madrid por sus comentarios a este trabajo.

## 8. Bibliografía

ANJOS, O.; PINA, P.; ROSA, M.E.; 1997. Comportamento mecanico da cortiça em compressao e sua relação com a porosidade. En: European Conference on Cork Oak and Cork. Lisboa.

ANJOS, O.; PEREIRA, H.; ROSA, M.E.; 2008. Effect of quality, porosity and density on the compression properties of cork. Holz RohWerkst. 66 295–301.

APCOR; 2010. Cork Sector in Numbers. Cork, Culture, Nature, Future. Cork Information Bureau 2010. <http://www.realcork.org> (acceso 08.01.13).

BARROS, L.; PEREIRA, H.; 1987. Influência do operador na classificação manual da cortiça por classes de qualidade. Cortiça 582 103–105.

BOWKER, A.H.; 1948. Test for symmetry in contingency tables. J. Am. Stat. Assoc. 43 572–574.

C.E. LIÈGE (Confederation Europee du Liège); 2006. International Code of Cork Stopper Manufacturing Practices, Version 5. <http://www.celiege.com> (acceso 02.10.09).

CORDEIRO, N.; BELGACEM, M.N.; GANDINI, A.; PASCOAL-NETO, C.; 1998. Cork suberin as a new source of chemicals. 2. Crystallinity, thermal and rheological properties. Bioresour. Technol. 63 153–158.

COSTA, A.; PEREIRA, H.; 2005. Quality characterization of wine cork stoppers using computer vision. J. Int. Sci. Vigne Vin 39 (4) 209–218.

COSTA, A.; PEREIRA, H.; 2006. Decision rules for computer-vision quality classification of wine natural cork stoppers. Am. J. Enol. Viticul. 57 (2) 210–219.

COSTA, A.; PEREIRA, H.; 2007. Influence of vision systems, black and white, colored and visual digitalization, in natural cork stopper quality estimation. J. Sci. Food Agric. 87 (12) 2222–2228.

COSTA, A.; PEREIRA, H.; 2013. Drying kinetics of cork planks in a cork pile in the field. Food Bioprod. Process. 91 14–22.

CUMBRE, F.; LOPES, F.; PEREIRA, H.; 2000. The effect of water boiling on annual ring width and porosity of cork. *Wood Fiber Sci.* 32 125–133.

DI ZENZO, S.; 1983. Advances in image segmentation. *Image Vision Comput.* 1 (4) 196–210.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN, J.I.; CONDE, M.; 2007. Manual técnico de secado de maderas. AITIM.

FORTES, M.A.; ROSA, M.E.; 1988. Densidade da cortica: Factores que a influenciam. *Bol. inst. Prod. Florestais* 593 65–69.

GARCÍA DE CECA, J.L.; GONZÁLEZ-ADRADOS, J.R.; SIMÓN, J.L.; 2000. Visual evaluation of cork anomalies to grade cork planks by thickness/quality. En: *Cork and Cork Oak World Congress*. Lisboa.

GARCÍA, M.C.; CADAHÍA, E.; GONZÁLEZ-ADRADOS, J.R.; GONZÁLEZ, F.; CRISTÓBAL, A.; CONDE, E.; 1996. Estudio de la composición química y características físicas del corcho de distintas procedencias y calidades. Caracterización, Clasificación y aplicaciones a la normalización. INIA. Madrid.

GIL, L.; 1998. Cortiça: produção tecnologia e aplicação, 1st ed. Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial. Lisboa.

GIL, L.; CORTIÇO, P.; 1998. Cork hygroscopic equilibrium moisture content. *Holz Roh Werkst.* 56 (5) 355–358.

GONZÁLEZ-ADRADOS, J.R.; CALVO HARO, R.M.; 1994. Variación de la humedad de equilibrio del corcho en plancha con la humedad relativa. Modelos de regresión no lineal para las isotermas de adsorción. *Invest. Agric. Sist. Recurs. For.* 3 (2) 199–209.

GONZÁLEZ-ADRADOS, J.R.; LOPES, F.; PEREIRA, H.; 2000. Quality grading of cork planks with classification models based on defect characterization. *Holz Roh Werkst.* 58 39–45.

ICMC (Instituto del Corcho, Madera y Carbón Vegetal); 2010. Manual Didáctico del Taponero. Junta de Extremadura, IPROCOR, FUNDECYT. Mérida (Badajoz). <http://www.iprocor.org> (acceso 10.09.10).

IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera); 2010. Estaciones Agroclimáticas. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. Sevilla. <http://web.ifapa.junta-andalucia.es> (acceso 07.09.10).

ISO 1216; 1998. Corkwood IN Plank - Grading, Classification and Packing.

KENDALL, M.; 1975. *Multivariate Analysis*. Charles Griffin & Co.Ltd. London.

LOPES, F.; PEREIRA, H.; 1997. Caracterização de pranchas de cortiça com diferente classificação industrial. En: *European Conference on Cork Oak and Cork*. 332–340.

- LOPES, F.; PEREIRA, H.; 2000. Definition of quality classes for champagne cork stoppers in the high quality range. *Wood Sci. Technol.* 34 3–10.
- MAGALHÃES, A.; PINHO, C.; 2008. Spouted bed drying of cork stoppers. *Chem. Eng. Process.* 47 2395–2401.
- MENDENHALL, W.; 1979. *Introduction to Probability and Statistics*. Duxbury Press, North Scituate. MA.
- PEREIRA, H.; 1992. The thermochemical degradation of cork. *Wood Sci. Technol.* 26 259–269.
- PEREIRA, H.; 1998. O calibre e a porosidade como parâmetros da qualidade tecnológica da cortiça em prancha. *Rev. Florestal* 2(XI) 46–50.
- PEREIRA, H.; 2007. *Cork: Biology, Production and Uses*. Elsevier. Amsterdam.
- PEREIRA, H., GRAÇA, J.; BAPTISTA, C.; 1992. The effect of growth rate on the structure and compressive properties of cork *Quercus suber* L. *IAWA Bull.* 13 389–396.
- PRADES, C.; GARCÍA-OLMO, J.; ROMERO-PRIETO, T.; GARCÍA DE CECA, J.L.; LÓPEZ-LUQUE, R.; 2010. Methodology for cork plank characterization (*Quercus suber* L.) by near-infrared spectroscopy and image analysis. *Meas. Sci. Technol.* 21 065602.
- PRATT, G.H.; MAUN, K.W.; CODAY, A.E.; 2010. *Timber Drying Manual*, 3rd ed. IHS BRE Press.
- ROBLEDANO, M.D.; PRADES, C.; GONZÁLEZ, J.A.; 2009. En: Zapata, S.(Ed.), *Cork Oak Woodlands and Cork Industry: Present, Past and Future*. 266–275. Girona.
- ROSA, M.E.; FORTES, M.A.; 1988. Stress relaxation and creep of cork. *J. Mater. Sci.* 23 35–42.
- ROSA, M.E.; FORTES, M.A.; 1993. Water-absorption by cork. *Wood Fiber Sci.* 25 (4) 339–348.
- ROSA, M.E.; PEREIRA, H.; FORTES, M.A.; 1990. Effects of hot water treatment on the structure and properties of cork. *Wood Fiber Sci.* 22 (2) 149–164.
- SACA (Servicio del Alcornocal y del Corcho en Andalucía); 2010. *Plan de Calas*. Junta de Andalucía. Sevilla. <http://www.cma.juntaandalucia.es> (acceso 08.02.11).
- UNE 56-913-88; 1998. Corcho en planchas, bornizo, rebusca, refugio y recortes. Determinación de humedad.
- UNE 56-915-88; 1998. Corcho en planchas comercialmente seco: Definiciones, calibrado, clasificación y embalaje.
- WU, K.; YANG, M.; 2002. Alternative c-means clustering algorithms. *Pattern Recogn.* 35 2267–2278.