

## **INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PROBETA EN LA VARIACIÓN DE LA DENSIDAD DE LA MADERA**

GUILLERMO RIESCO MUÑOZ

Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Santiago de Compostela.  
Escuela Politécnica Superior de Lugo. Campus Universitario s/n, 27002 Lugo (España)  
Correo electrónico: riescomu@lugo.usc.es

### **Resumen**

La determinación de las propiedades físicas de la madera a partir de probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos se basa en el ensayo de un gran número de piezas, a fin de ofrecer estimadores muestrales precisos de las variables en estudio. El tamaño de muestra habrá de ser tanto mayor cuanto más variación presente la propiedad a analizar. La variación depende de la propiedad analizada pero también influye el tamaño de probeta empleado en el ensayo, de manera que sería útil conocer para cada propiedad cómo varía su dispersión (desviación típica, varianza, coeficiente de variación) en función del tamaño de probeta empleado, para dimensionar de forma adecuada la muestra a ensayar. En el presente trabajo se analiza la influencia del tamaño de probeta en la densidad de la madera de cuatro especies forestales: dos frondosas caducifolias de anillo poroso (*Quercus robur* y *Castanea sativa*) y dos coníferas (*Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*). Se presenta un modelo para roble que predice la dispersión de resultados a partir de las dimensiones de las probetas ensayadas.

Palabras clave: propiedades físicas, *Quercus robur*, *Castanea sativa*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*

### **INTRODUCCIÓN**

La determinación de las características físicas y mecánicas de la madera mediante el ensayo de piezas de madera limpia, sin defectos, pretende conocer las propiedades intrínsecas del material en ausencia de alteraciones debidas a singularidades anatómicas (nudos, fendas, galerías de xilófagos, etc). Los valores de las propiedades obtenidos sobre madera sin defectos permiten comparar la madera entre zonas de un mismo árbol, entre árboles, entre procedencias o entre especies, estableciendo relaciones con las circunstancias del medio. Con ello, es posible estudiar el fundamento físico y biológico de las propiedades de la madera. Para conseguir fácilmente piezas de madera libres de defectos como material de ensayo es necesario usar probetas de madera de pequeño tamaño. Los resultados de los ensayos efectuados sobre pequeñas probetas de madera limpia suelen estar sujetos a una elevada dispersión por lo que es necesario realizar numerosos ensayos para lograr una precisión aceptable en las estimaciones. El número de ensayos a realizar viene condicionado por el diseño de muestreo elegido, por la precisión esperada de los resultados y por la variabilidad de la propiedad objeto de análisis. La variabilidad en las propiedades de la madera obedece a factores genéticos (especie, procedencia, individuo), variables ambientales (estación forestal, selvicultura aplicada) así como a factores que determinan las características de la madera según su posición en el fuste (DESCH & DINWOODIE, 1996; FONSECA, 1989; RIOU-NIVERT, 1991).

La norma española (AENOR, 1978) recomienda un tamaño de muestra mínimo a ensayar, dado por la expresión del muestreo aleatorio para poblaciones infinitas:

$$n_{\min} \geq \frac{t_{\alpha}^2 CV^2}{e^2}$$

donde  $n_{min}$  es el número mínimo de probetas a ensayar

$t_{\alpha}$  es la  $t$  de Student al nivel de significación  $\alpha$  para el que se ofrecen los resultados

$CV$  es el coeficiente de variación previsto para la variable en estudio, en porcentaje

$e$  es el error máximo admisible en la estimación de la variable en estudio, en porcentaje. Se recomienda emplear un valor del 5 %.

El resultado de la fórmula anterior es un umbral mínimo que conviene superar holgadamente puesto que, por diversas causas, parte de las probetas no son válidamente ensayadas. Tras los ensayos se comprueba si la intensidad de muestreo ha sido suficiente verificando que el error de muestreo realmente cometido es inferior al previsto ( $e$ ). La misma norma (AENOR, 1978) establece coeficientes de variación para diferentes propiedades de la madera. La aplicación de la fórmula anterior para tales coeficientes de variación, con un error máximo admisible del 5 % y los niveles de significación usuales, ofrece un tamaño de muestra muy pequeño para la variable peso específico (tabla 1). Esto es atribuible a un coeficiente de variación estimado a la baja, aunque el Forest Products Laboratory (1999) también propone el 10 % como media del coeficiente de variación para 50 especies ensayadas en verde. En España, para *Pinus pinaster* se citan coeficientes de variación del peso específico al 12 % de humedad entre el 7,95 % de Prades *et al.* (2001) y el 13,6 % de Remacha (1987). También en España, para *Pinus sylvestris* se han encontrado coeficientes de variación del peso específico al 12 % de humedad entre 8,7 % (FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, 2002) y 12,5 % (FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO y DÍEZ BARRA, 1994). Por tanto, teniendo en cuenta las referencias anteriores, parece adecuada la propuesta de la norma (AENOR, 1978) sobre un coeficiente de variación tan bajo como el 10 %.

La norma anterior no especifica el número mínimo de árboles a muestrear ni el tamaño de muestra mínimo a tomar en cada árbol muestreado. Para aclarar estos aspectos, determinantes de la intensidad de muestreo, puede acudir a la norma europea (AENOR, 2004), que establece un mínimo de 5 árboles muestreados y un mínimo de 40 probetas.

La variación de una propiedad se ve afectada por el tamaño de probeta empleado para determinarla, de forma que la dispersión de los resultados es tanto menor cuanto más grandes son las probetas ensayadas. En el presente trabajo se analiza cómo varía la dispersión de los resultados de peso específico al 12 % de humedad en función del tamaño de probeta empleado en su determinación, para dimensionar de forma adecuada el tamaño de muestra.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se ha centrado en la madera de cuatro especies forestales muy presentes en los montes españoles y en la industria nacional de la madera. La distribución de la muestra ha sido la siguiente: 36 ejemplares de pino pinaster (*Pinus pinaster* Ait.), 5 ejemplares de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L.), 46 ejemplares de roble (*Quercus robur* L.) y 5 ejemplares de castaño (*Castanea sativa* Mill.).

De cada fuste se obtuvieron rodajas de la sección transversal completa a varias alturas de fuste (base, final de fuste y alturas intermedias). Las rodajas se acondicionaron y labraron de forma normalizada (AENOR, 1978) para obtener las probetas de pequeñas dimensiones libres de defectos que son el material de ensayo. Se labraron probetas prismáticas con las aristas paralelas a las direcciones principales de la madera. Las probetas se estabilizaron en la atmósfera de laboratorio hasta alcanzar la humedad de equilibrio higroscópico. En la tabla 2 aparecen las dimensiones nominales de las probetas, muy similares a las dimensiones reales.

En total fueron válidamente ensayadas 900 probetas, repartidas en 15 lotes de 60 probetas cada una (tabla 2). Las probetas de un mismo lote tienen las mismas dimensiones nominales y pertenecen a la misma especie forestal. En cada probeta de cada lote se evaluó como propiedad física el peso específico al 12 % de humedad.

Para calcular el peso específico se necesita conocer el peso y las tres dimensiones principales de cada probeta a la humedad de equilibrio higroscópico (que debe ser próxima al 12 %) y en estado anhidro. Cada probeta se consideró como un prisma perfecto en el que la sección transversal es el producto de la dimensión tangencial por la radial y el volumen se obtiene multiplicando las tres dimensiones principales. Las mediciones se efectuaron con una precisión de 0,01 mm y las pesadas se efectuaron con precisión de 0,01 g. Para llevar las probetas al estado anhidro se mantuvieron en estufa con circulación de aire a 103 °C hasta la desecación completa. Antes de proceder a la medición de las probetas desecadas, se efectuó su enfriado en ambiente desecante, para evitar que absorbieran humedad.

Sobre cada probeta se determinó el peso específico aparente  $\rho_H$  a la humedad de equilibrio higroscópico  $H$  (AENOR, 1977b). El peso específico aparente se corrigió para expresarlo al 12 % de humedad de equilibrio higroscópico mediante la expresión siguiente:

$$\rho_{12} = \rho_H [1 - 0,01(1 - v)(H - 12)]$$

donde  $\rho_{12}$  es el peso específico en kg/m<sup>3</sup> al 12 % de humedad

$\rho_H$  es el peso específico aparente en kg/m<sup>3</sup>, a la humedad de equilibrio higroscópico  $H$

$v$  es el coeficiente de contracción volumétrica de la probeta en porcentaje

$H$  es la humedad de equilibrio higroscópico de la probeta en porcentaje.

La humedad de equilibrio higroscópico se determinó por el método de desecación en estufa y diferencia de pesadas entre estado húmedo y estado anhidro (AENOR, 1977a). El coeficiente de contracción volumétrica ( $v$ ) se calculó como la variación de volumen entre el estado de equilibrio higroscópico y el estado anhidro, expresada en porcentaje del volumen en estado anhidro y por grado de humedad (AENOR, 1977c).

Se calculan los estadísticos descriptivos de dispersión de cada lote para el peso específico al 12 %. Los estadísticos de dispersión pueden ser absolutos (desviación típica, cuasivarianza, amplitud) o relativos (coeficiente de variación, coeficiente de apertura). Se ha optado por los estadísticos dispersión relativa a fin de comparar lotes de probetas que no van a presentar iguales medidas de posición (media, moda, mediana) aun perteneciendo a la misma especie forestal. El coeficiente de variación es el resultado de multiplicar por cien el cociente entre la desviación típica y la media aritmética de la distribución de valores. El coeficiente de apertura es el cociente entre el valor máximo y el valor mínimo de la distribución. El coeficiente de apertura es una medida de dispersión relativa de obtención sencilla pero se basa solo en los valores extremos de la distribución, por lo que se empleará el más fiable coeficiente de variación, que se basa en los valores de la distribución completa.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estadísticos descriptivos de posición y dispersión del peso específico ( $\rho_{12}$ ) aparecen en la tabla 2 para cada lote de probetas analizado. Se observa en primer lugar que los promedios para una misma especie son similares en los diferentes lotes, como cabe esperar al tratarse de muestras procedentes de una misma población, aunque las diferencias entre medias existen por lo que se reafirma la necesidad de acudir a medidas de dispersión relativas para poder comparar la dispersión entre lotes con tamaño de probeta diferente para cada especie.

El número de árboles muestreado es muy diferente en cada especie por lo que no son comparables los coeficientes de variación entre especies diferentes, siendo además distintos los ámbitos geográficos de los que procede el material de ensayo en cada especie. Ambas circunstancias condicionan fuertemente la heterogeneidad de la madera empleada ya que se cita que las cuatro especies muestran un peso específico al 12 % muy variable entre individuos (LOUZADA, 1991;

LOUZADA & FONSECA, 1991; RIESCO MUÑOZ, 2001).

El coeficiente de variación es el cociente entre una desviación típica, que se distribuye según una Chi-cuadrado, y una media, que presenta una distribución normal. Como no se conoce la distribución estadística de una Chi-cuadrado dividida por una variable gaussiana, al coeficiente de variación no se le puede asignar una distribución ni se le puede establecer intervalos de confianza, con lo cual su análisis no se basa en la obtención de diferencias significativas entre intervalos sino en el estudio de valores numéricos discretos.

El coeficiente de variación evoluciona en función del volumen nominal de la probeta ensayada de forma diferente en las cuatro especies (figura 1). En las coníferas se aprecia una pauta de variación similar, con una reducción muy considerable del coeficiente de variación. En concreto, el coeficiente de variación en *Pinus pinaster* se reduce aproximadamente en un 30 % y en *Pinus sylvestris* se reduce en un 20 % cuando el volumen de probeta se duplica. Por el contrario, en las frondosas es mucho menos acusada la reducción del coeficiente de variación a medida que aumenta el volumen de probeta. Así, en el roble, el coeficiente de variación se reduce tan solo en un 20 % cuando el tamaño de probeta se multiplica por quince. Así mismo, en las frondosas la tendencia de la dispersión frente al tamaño de probeta tiene un comportamiento errático en los volúmenes menores y no es similar en ambas especies.

En roble, que es la especie para la que se dispone de más lotes de probetas, se aprecia la tendencia decreciente que se comenta para la figura 1 aunque con un repunte hacia las dimensiones mayores, lo cual puede atribuirse a la dificultad, creciente con el tamaño de probeta, para escoger piezas estrictamente de madera limpia, lo que lleva a un cierto incremento de la dispersión en los lotes de tamaño mayor, debido posiblemente a la presencia de defectos internos en algunas probetas, defectos no visibles al exterior. La evolución del coeficiente de variación con las diferentes dimensiones de las probetas (figuras 2 y 3) muestra una tendencia decreciente y algo irregular en los tamaños menores, al igual que sucede con el volumen. La tendencia variable del coeficiente de variación en probeta pequeña puede atribuirse a la semejanza de magnitud entre las dimensiones analizadas y la anchura de anillos de crecimiento en la madera. Es decir, la probeta pequeña no tiene dimensión suficiente (sobre todo en dirección tangencial) para promediar las fuertes diferencias de peso específico entre madera de primavera y madera de verano dentro del anillo en especies como las estudiadas, con anillos claramente marcados. Por tanto, es probable que existan notables diferencias de peso específico entre probetas en un lote de probeta pequeña, lo que ocasiona un coeficiente de variación poco predecible.

La disponibilidad de datos en roble lleva a probar para esa especie el ajuste de regresión de un modelo que relacione tamaño de probeta y coeficiente de variación. Se ajustaron varios modelos monótonos decrecientes para describir la tendencia natural a la reducción del coeficiente de variación con tamaño de muestra creciente. Para simplificar el análisis se ensayaron solo modelos linealizables y biparamétricos (tabla 3). El mejor resultado es el que ofrece el modelo semilogarítmico:

$$CV = 13,0362 - 0,6899 \ln(x)$$

donde  $CV$  es el coeficiente de variación expresado en porcentaje

$x$  es el tamaño de probeta en  $\text{cm}^3$  (rango de validez del modelo:  $8 < x < 150$ ).

Es un modelo superior al modelo potencial propuesto por Freese (1961) en la forma  $CV = ax^{-0,25}$ .

## CONCLUSIONES

La variable peso específico al 12 % de humedad presenta una dispersión de resultados tanto más baja cuanto mayor es el tamaño de las probetas empleadas en su determinación. En las coníferas la reducción es muy apreciable y debe tenerse en cuenta el efecto del tamaño de probeta en la

previsión de los coeficientes de variación en los diseños de muestreo con probetas de madera limpia de pequeñas dimensiones. Por el contrario, en madera de frondosas la influencia del tamaño de probeta en la dispersión de resultados es poco apreciable salvo que se trabaje con probetas de tamaño muy diferente. La tendencia claramente decreciente de la dispersión (evaluada mediante el coeficiente de variación) respecto del tamaño de probeta (evaluado por cualquiera de sus dimensiones principales, sección transversal o volumen) es modelizable aunque existen ciertas dificultades a la hora de plantear un modelo ya que con probeta grande el coeficiente de variación tiende a crecer ligeramente y con probeta muy pequeña la tendencia del coeficiente de variación no es sostenida. El primer efecto puede atribuirse a que en probeta grande hay mayor probabilidad de ensayar como madera limpia una pieza con defectos internos y sin defectos exteriores aparentes. El segundo efecto puede atribuirse a que la anchura de anillos es del orden de magnitud de las dimensiones de las probetas más pequeñas, que no pueden promediar las características heterogéneas del peso específico en el interior del anillo. Sería deseable contrastar este extremo mediante el análisis del coeficiente de variación en probetas de varios tamaños procedentes de madera de frondosas de anillo difuso, en las que la homogeneidad de peso específico dentro del anillo de crecimiento permite conjeturar que la relación entre dispersión y tamaño de probeta sería más fácil de modelizar que en coníferas o en frondosas de poros en anillos.

## BIBLIOGRAFÍA

AENOR; 1977a. Norma UNE 56529:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del contenido de humedad por desecación hasta el estado anhidro. 2 pp.

AENOR; 1977b. Norma UNE 56531:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación del peso específico. 2 pp.

AENOR; 1977c. Norma UNE 56533:1977. Características físico-mecánicas de la madera. Determinación de las contracciones lineal y volumétrica. 2 pp.

AENOR; 1978. Norma UNE 56528:1978. Características físico-mecánicas de la madera. Preparación de probetas para ensayos. 4 pp.

AENOR; 2004. Norma UNE-EN 384:2004. Madera estructural. Determinación de los valores característicos de las propiedades mecánicas y la densidad. 18 pp.

DESCH, H.E. & DINWOODIE, J.M.; 1996. Timber. Structure, properties, conversion and use (7<sup>th</sup> ed.). MacMillan Press Ltd. Hong-Kong. 306 pp.

FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ, C.; 2002. Análisis comparativo de la densidad de la madera mediante la utilización del resistógrafo en *Pinus sylvestris* L. y *Picea abies* Karst. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Politécnica Superior. Lugo. 178 pp.

FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO, J.I. y DÍEZ BARRA, M.R.; 1994. Influencia de la anchura del anillo de crecimiento en la densidad y otras propiedades físico-mecánicas de la madera estructural de diversas especies. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*. 3(2): 211-219.

FONSECA, F.M.A.; 1989. Variação na madeira de *Pinus pinaster* Ait. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 245 pp.

FRESE, F.; 1961. Relation of plot size to variability: an approximation. *Jour. of For.* 59:679.

LOUZADA, J.L.P.C.; 1991. Variação nas componentes da densidade na madeira de *Pinus pinaster* Ait. Série Técnica-Científica, 12. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 113 pp.

LOUZADA, J.L.P.C. & FONSECA, F.M.A.; 1991. Influência do crescimento em diâmetro (DAP) e

da qualidade do local na variação da densidade em *Pseudotsuga menziesii* Mirb. (Franco). Série Técnica-Científica, 10. Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro. Vila Real. 28 pp.

FOREST PRODUCTS LABORATORY; 1999. Wood Handbook. Wood as an engineering material. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 463 pp.

PRADES, C.; MONTERO, A. y RUBIO, J.; 2001. Características físico-mecánicas de la madera de *Pinus pinaster* Ait., procedente de los montes del Marquesado (provincia de Granada). En: *Actas del III Congreso Forestal Español*, 5: 665-670.

REMACHA, A.; 1987. Características del pino gallego y aplicaciones. AITIM. Madrid. 72 pp.

RIESCO MUÑOZ, G.; 2001. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la madera de roble (*Quercus robur* L.) de Galicia en relación con las variables del medio. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 749 pp.

RIOU-NIVERT, P.; 1991. La qualité du bois des résineux. Les derniers résultats de la recherche. *Forêt-entreprise*. 80: 11-12.

Tabla 1. Tamaño de muestra para algunas propiedades de la madera, con un error de muestreo máximo admisible del 5 % y varios niveles de significación  $\alpha$  (AENOR, 1978).

Propiedad	coeficiente de variación (%)	número mínimo de probetas		
		$\alpha = 10\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 1\%$
Peso específico	10	013	018	031
Humedad de equilibrio	5	009	010	011
Contracción lineal	28	085	120	208
Contracción volumétrica	16	030	039	068

Tabla 2. Resultado de los ensayos de determinación del peso específico al 12 % de humedad.

Especie	dimensiones nominales de probetas					<i>n</i>	peso específico al 12 % (en kg/m <sup>3</sup> )			
	<i>L</i>	<i>R</i>	<i>T</i>	<i>S</i>	<i>V</i>		media	desviación típica	mín.	máx.
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>3</sup> )					
<i>Quercus robur</i>	2	2	2	4	8	60	750	87	526	0946
	4	2	2	4	16	60	774	83	556	0968
	5	2	2	4	20	60	789	87	617	1009
	6	2	2	4	24	60	788	89	602	0998
	2	4	4	16	32	60	756	83	561	0911
	1,7	9,8	4,9	47,4	81,7	60	815	79	603	1006
	30	2	2	4	120	60	766	70	638	1023
	6	5	5	25	150	60	800	81	637	0951
<i>Castanea sativa</i>	2	2	2	4	8	60	584	50	510	0689
	4	2	2	4	16	60	542	55	547	0556
	2	4	4	16	32	60	553	45	498	0648
<i>Pinus</i>	4	2	2	4	16	60	467	51	375	0575
<i>pinaster</i>	2	4	4	16	32	60	515	39	437	0599
<i>Pinus</i>	4	2	2	4	16	60	470	50	365	0640
<i>sylvestris</i>	2	4	4	16	32	60	483	43	407	0657

*L*: dimensión longitudinal; *R*: dimensión radial; *T*: dimensión tangencial; *S*: sección transversal; *V*: volumen; *n*: número de datos.

Tabla 3. Ajuste de modelos para coeficiente de variación *CV* (%) y volumen de probeta *x* (cm<sup>3</sup>). *n* = 8 lotes de madera de roble.

Modelo	<i>R</i> <sup>2</sup>
--------	-----------------------

$CV = a + b \ln(x)$	0,77**
$CV = ax^b$	0,75**
$CV = a + bx$	0,68**
$CV = e^{a+bx}$	0,67**
$CV = a + b/x$	0,60**
$CV = e^{a+b/x}$	0,58**

a, b: constantes del modelo; \*correlación significativa al 95 % de probabilidad; \*\*correlación significativa al 99 % de probabilidad.

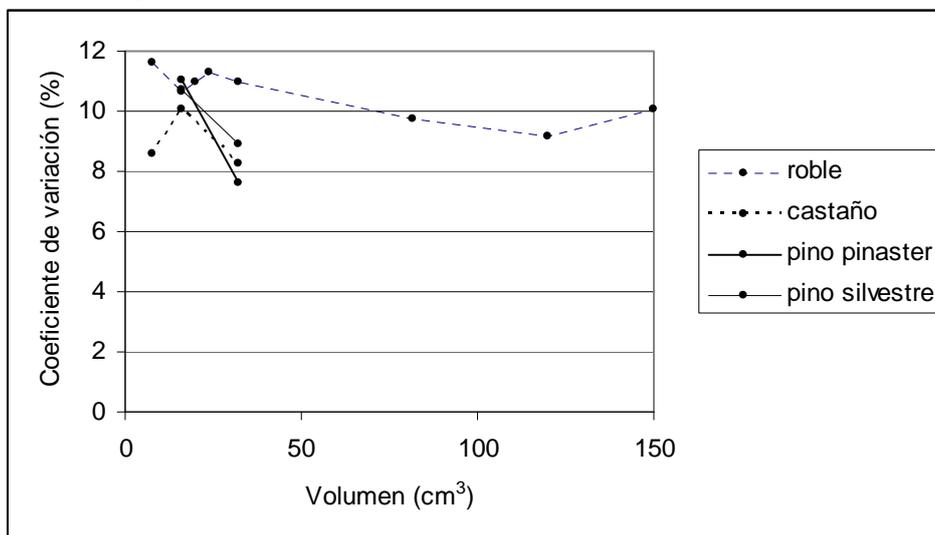


Figura 1. Influencia del volumen de la probeta ensayada en el coeficiente de variación de la variable peso específico al 12 % de humedad. (Cada punto está calculado sobre 60 datos).

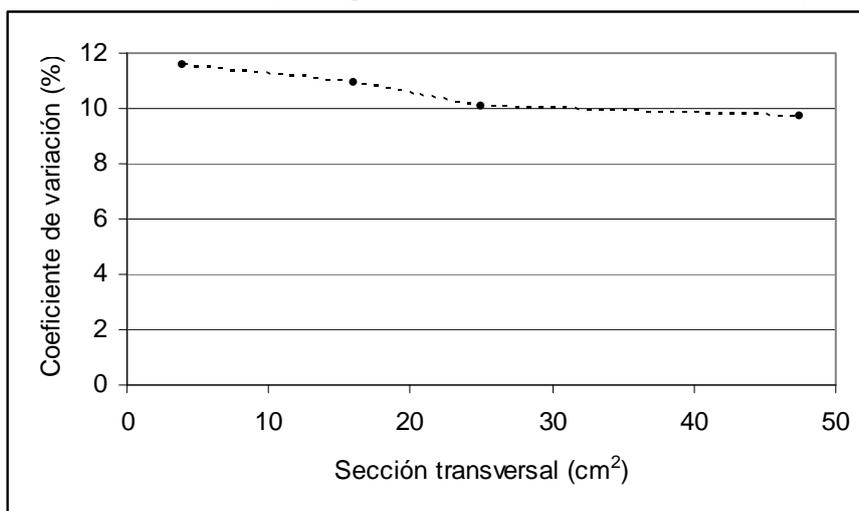


Figura 2. Influencia de la sección transversal de la probeta en el coeficiente de variación de la variable peso específico al 12 % de humedad. (Cada punto está calculado sobre 60 datos).

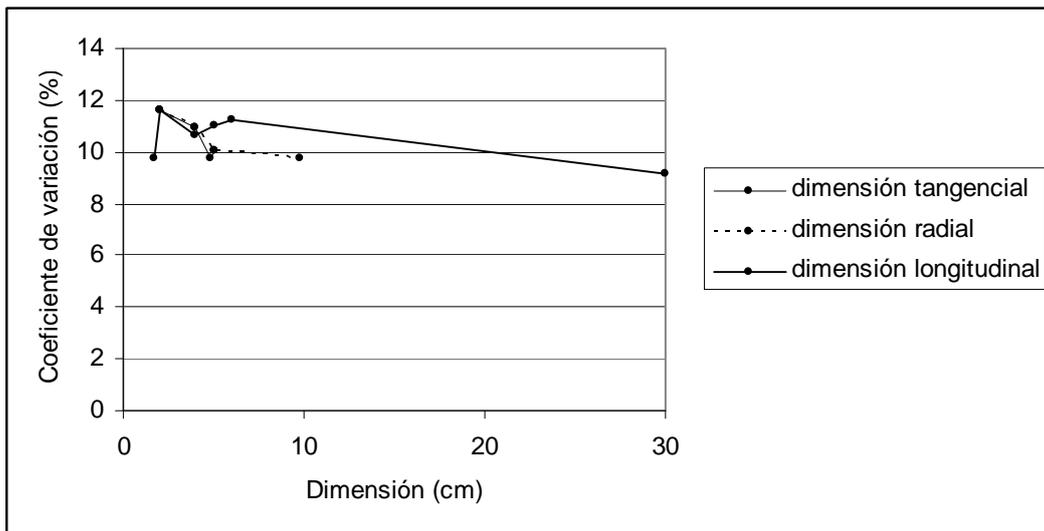


Figura 3. Influencia de cada dimensión de la probeta en el coeficiente de variación de la variable peso específico al 12 % de humedad. (Cada punto está calculado sobre 60 datos).