

**Propiedades tecnológicas de la madera de  
*Grevillea robusta* y desarrollo de programas  
de secado adaptados a la pequeña y  
mediana industria regional**

PIA 10044

Ing. Ftal Mariano Hernández

Corrientes, 14 de Agosto de 2015

El PIA 10044 involucra dos estudios diferentes:

A) Estudio de la **variación de la densidad básica** de la madera de *Grevillea robusta* en plantaciones de la Mesopotamia Argentina

B) Estudio del **secado** en cámara de la madera de *Grevillea robusta*

# Responsables



**Instituto Nacional de Tecnología  
Agropecuaria (INTA)  
Grupo Calidad de la Madera.  
Estación Experimental Agropecuaria  
Bella Vista**

**Ing. Ftal. Pabla Yolanda GENES**

**Ing. Ftal. Mariano Agustín HERNANDEZ**

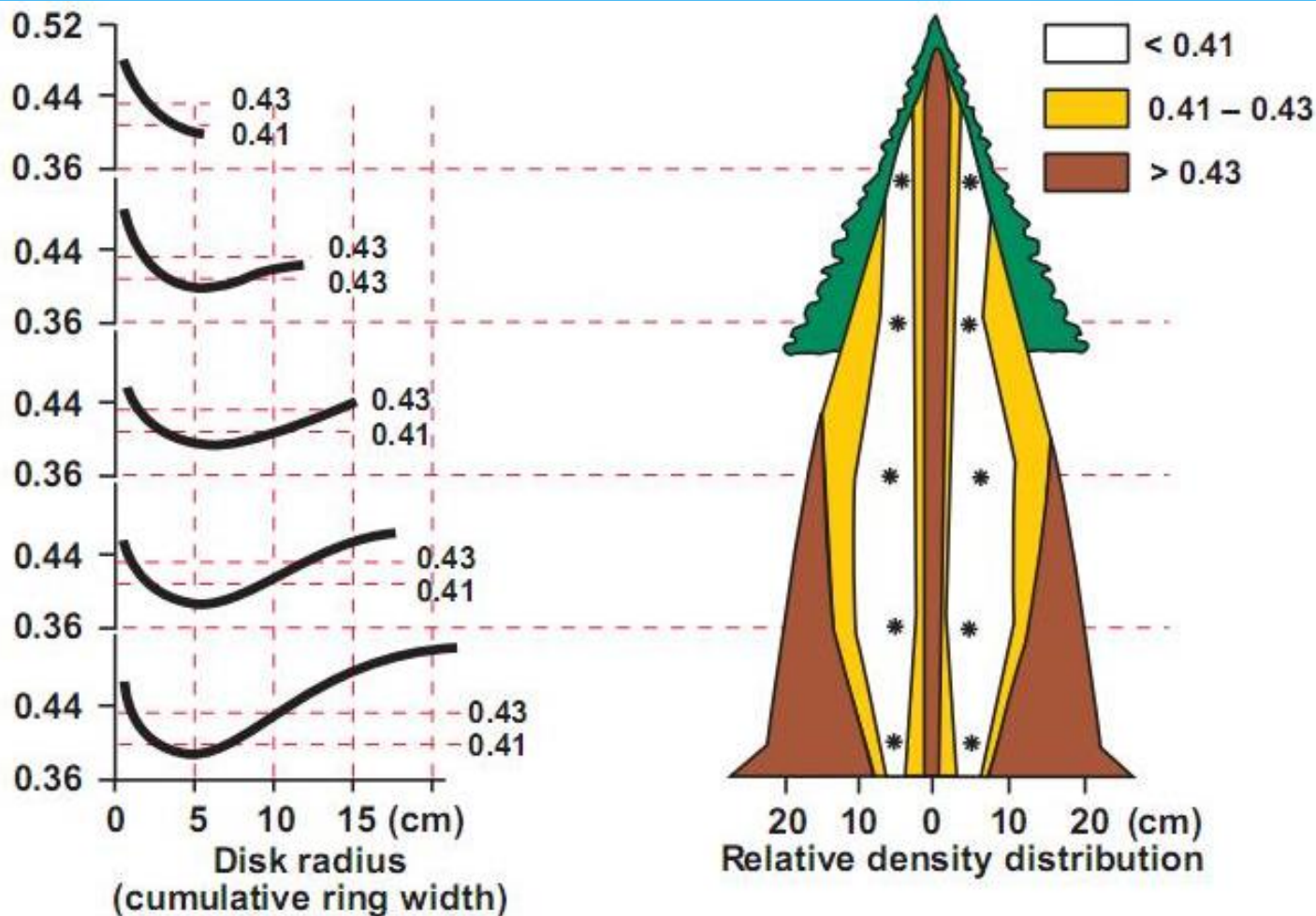
**Ing. Agr. (M. Sc.) Juan Adolfo LOPEZ**



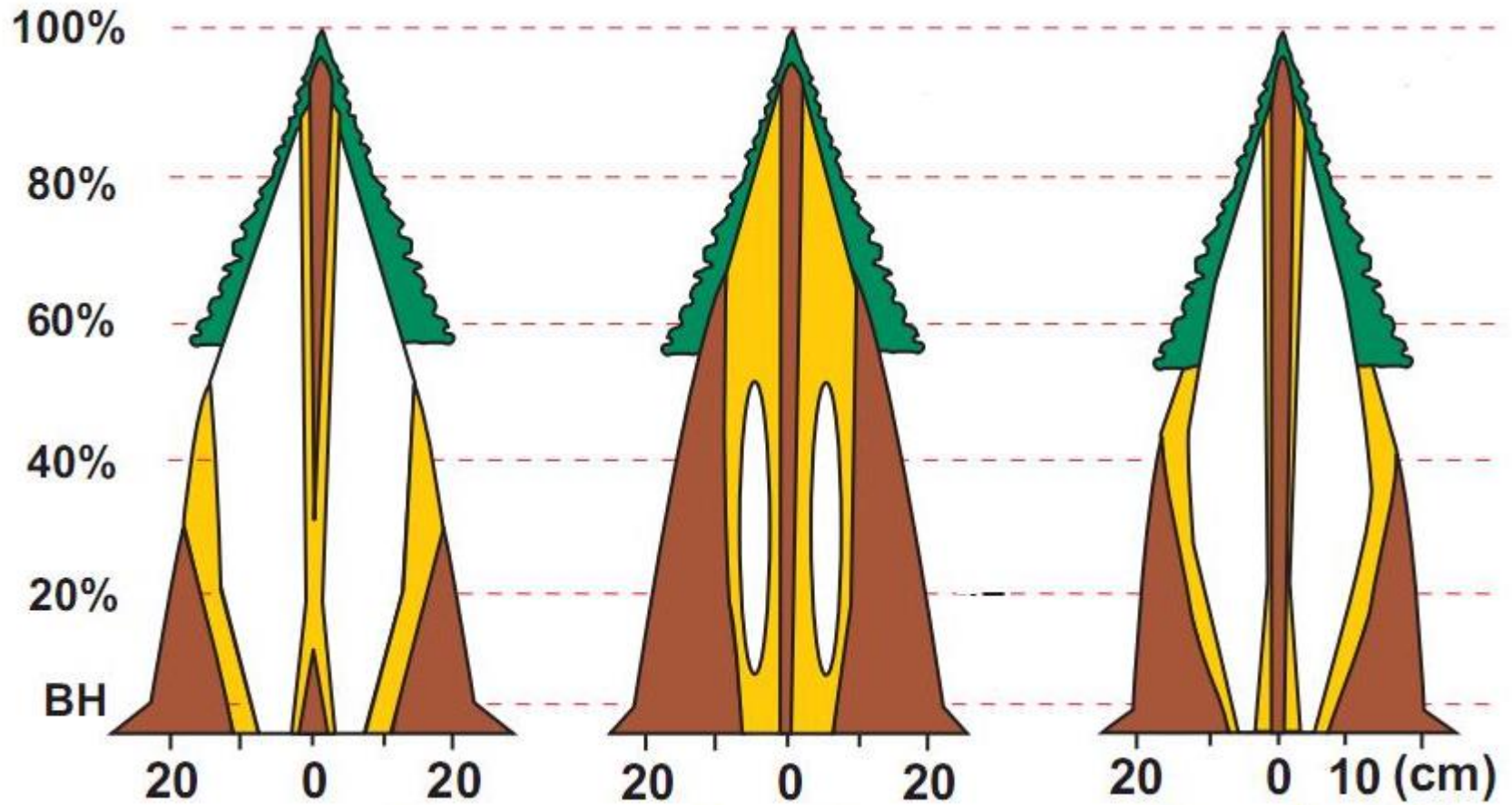
**Cátedra de Tecnología de la madera  
Facultad de Recursos Naturales  
Universidad Nacional de Formosa**

**Ing. Ftal. Esteban ARIAS**

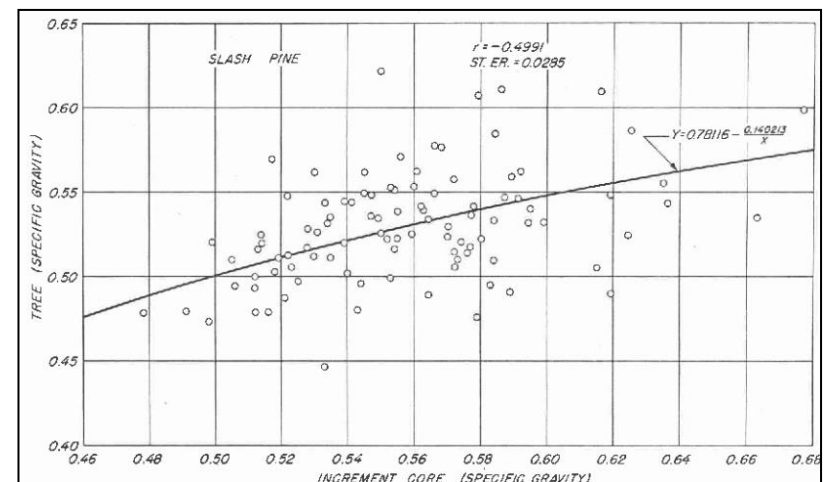
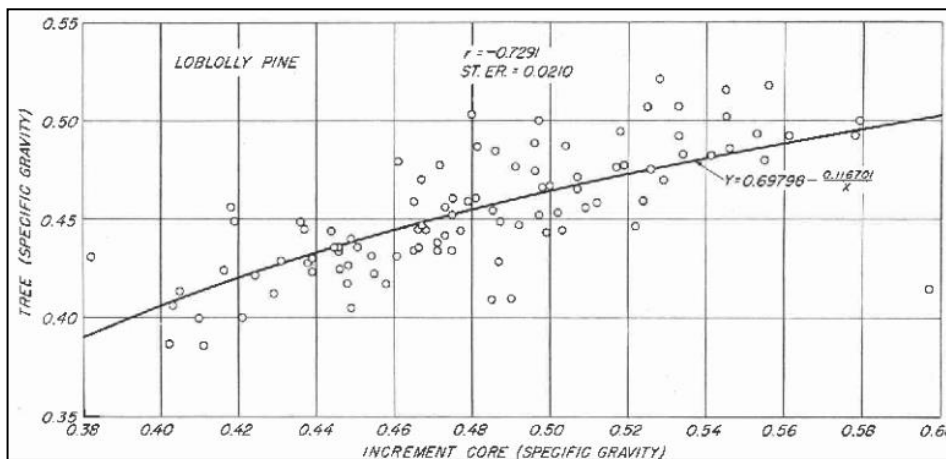
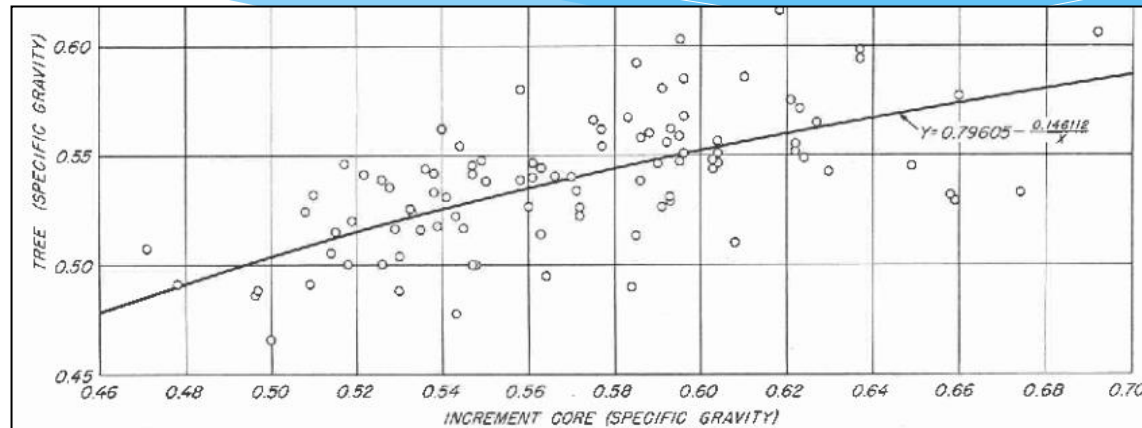
# A) Estudio de la **variación de la densidad básica** de la **variedad dentro del fuste** en plantaciones de la Mesopotamia Argentina



# Variación entre árboles



# Estimación de la densidad básica del árbol completo a partir de muestras de madera obtenidas a la altura del pecho



# Justificación del estudio

1. El conocimiento de la variabilidad entre árboles es fundamental para su aprovechamiento en programas de selección genética.
2. El conocimiento de la variabilidad de la densidad básica dentro del fuste permite mejorar la eficiencia del procesamiento industrial a través de la clasificación y determina el uso más adecuado de las piezas aserradas.

# Objetivos

Validar la relación entre la densidad de la madera promedio del árbol completo y la densidad de la madera a la altura del pecho en árboles de *Grevillea robusta*.

Determinar el patrón de variación radial y axial de la densidad de la madera

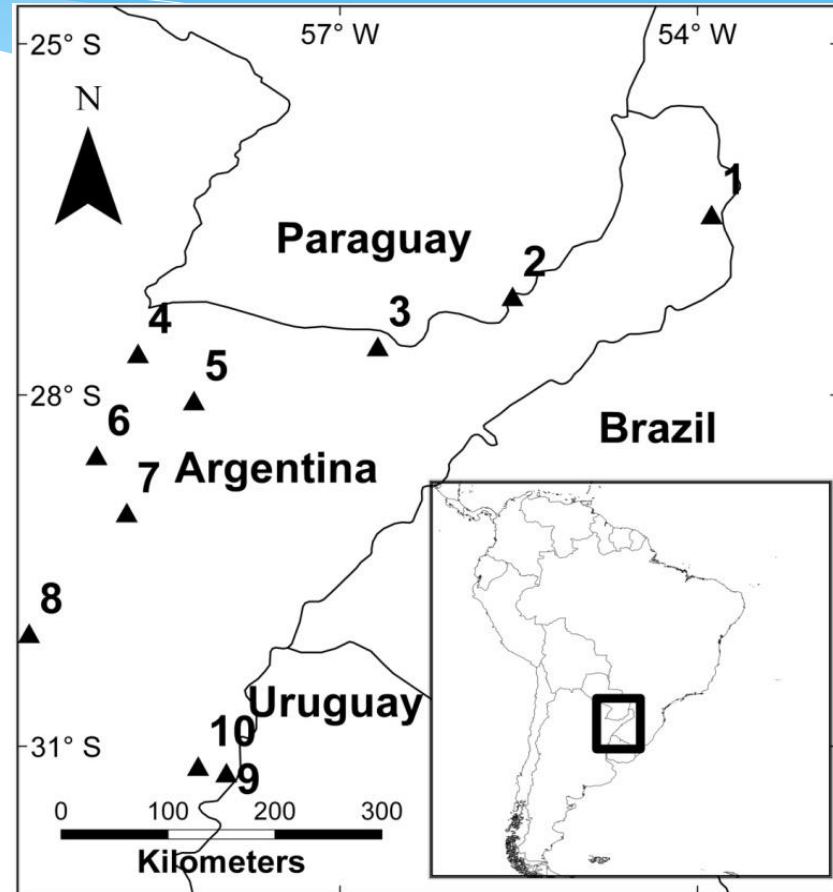
Cuantificar y comparar la variación dentro del fuste del árbol y entre árboles en *Grevillea robusta*.



# Materiales y métodos

## Material:

- 10 sitios
- Edad: 14 a 34 años
- 6 árboles por sitio (n =60)
- 5 alturas de muestreo:  
Base, AP, 25%, 50% y 75%  
de la HT

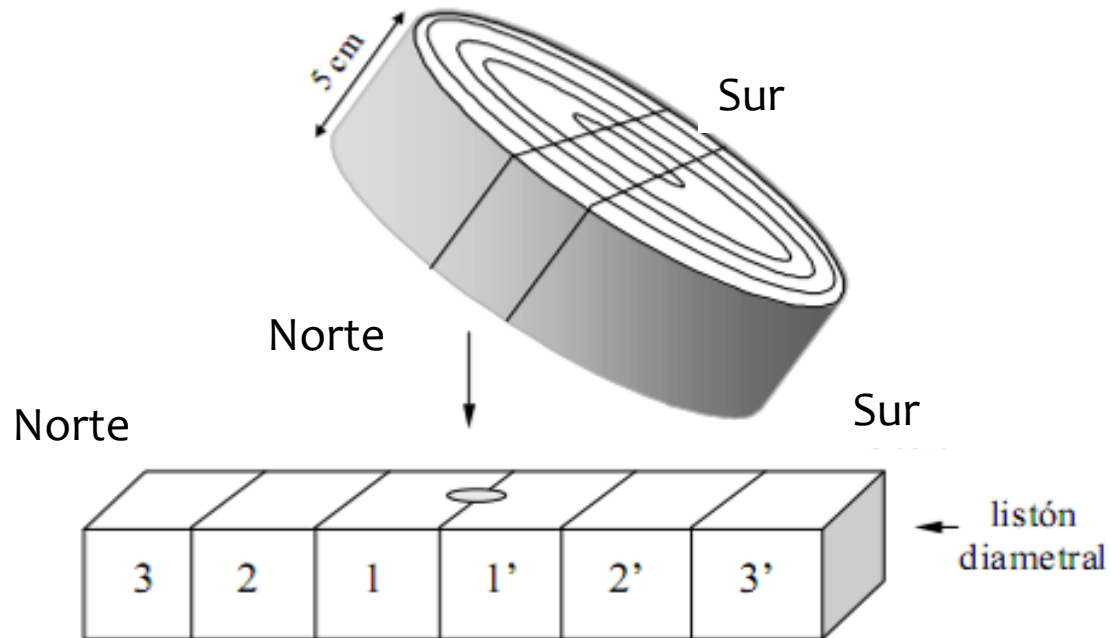




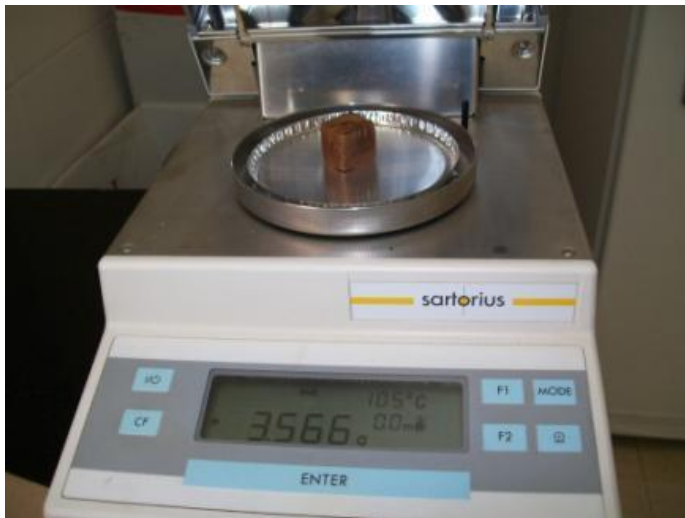


# Mediciones de laboratorio

## Construcción de probetas para determinación de propiedades físicas



Fuente: López y Staffieri (2003)



# Análisis de datos

Dos conjuntos de datos:

1) Todos los sitios

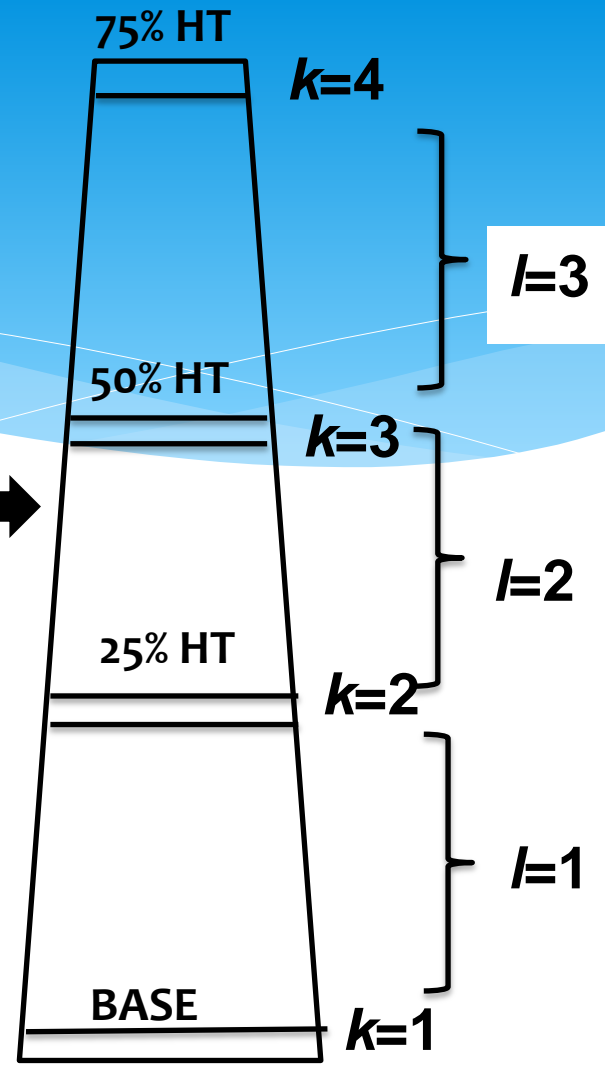
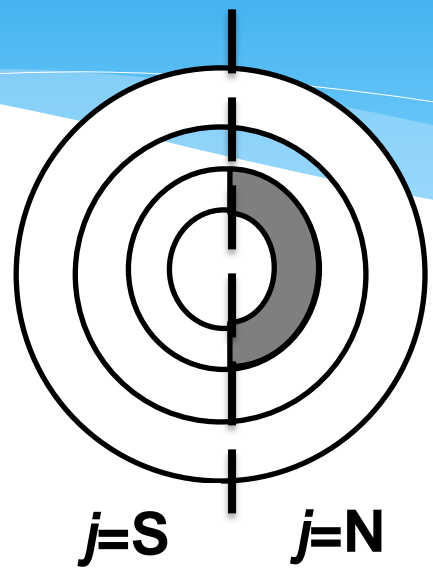
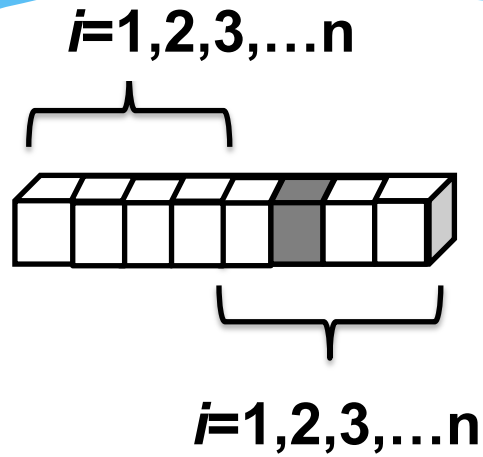
2) Tres sitios con la misma clase de edad (32-34 años)

# Análisis de datos

## 1) Todos los sitios

Estimación de la densidad básica del árbol completo a partir de muestras de madera obtenidas a la altura del pecho

$$Densidad (WT) = a + b * Densidad AP$$



$$A_{ijk} = \frac{\pi}{2} (r_{ijk}^2 - R_{ijk}^2) \quad [1]$$

$$Dr_k = \frac{\sum D_{ijk} \times A_{ijk}}{\sum_{ij=1}^n A_{ijk}} \quad [2]$$

$$D_A = \frac{\sum_{l=1}^3 \{ [(Dr_k + Dr_{k-1}) / 2] \times V_l \}}{\sum_{l=1}^3 V_l} \quad [3]$$



3 grupos:

Grupo A: Clase de edad 18-19 años (sitios 1, 2, 6, 9)

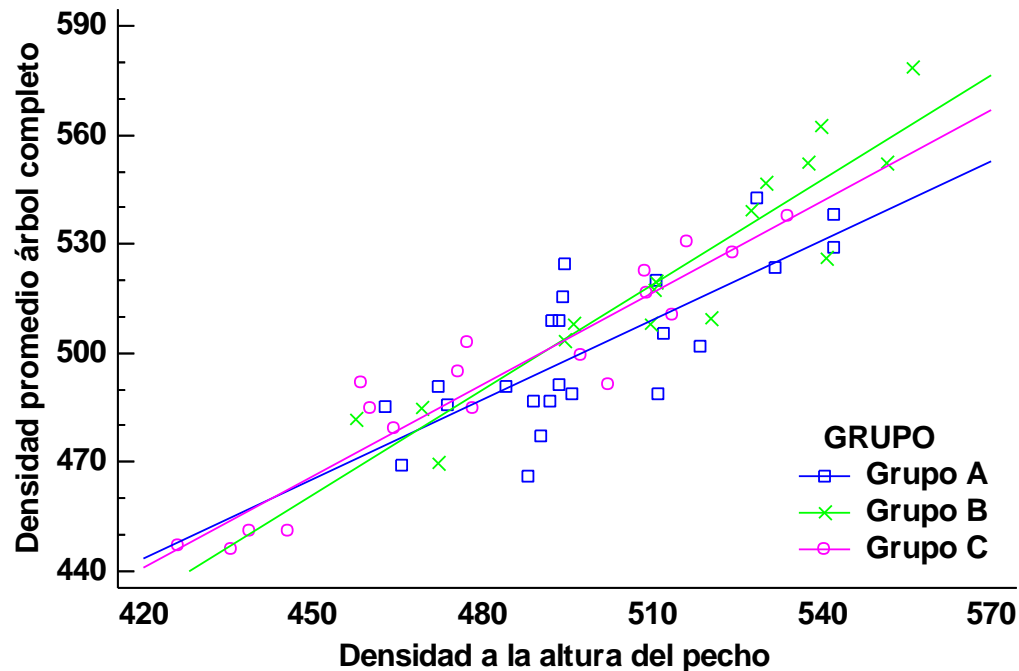
Grupo B: Clase de edad 32-34 años (sitios 4,7, 10)

Grupo C: Árboles de diferente edad (sitios 3, 5, 8).

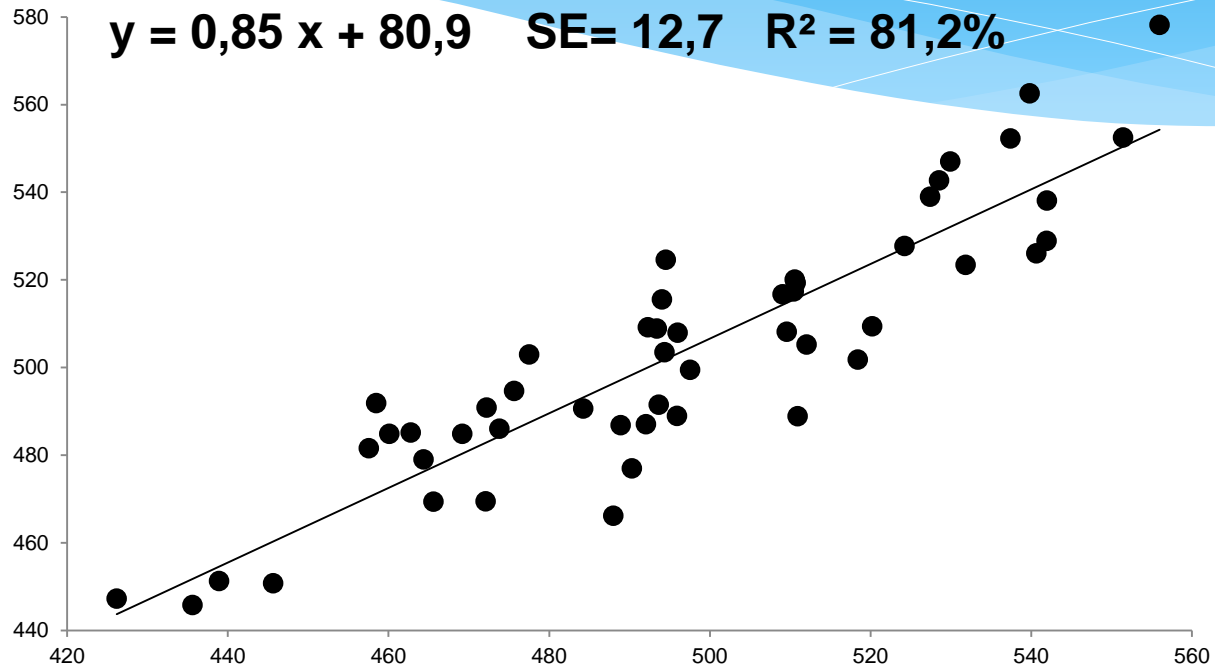
Condición a cumplir:

Hipótesis nula: Igualdad de pendientes entre grupos

**P-valor: 0,34**



Densidad básica del árbol completo (kg/m<sup>3</sup>)



Densidad básica a la altura del pecho (kg/m<sup>3</sup>)

## 2) Tres sitios con la misma clase de edad (32-34 años)

### a) Análisis de la varianza (GLM)

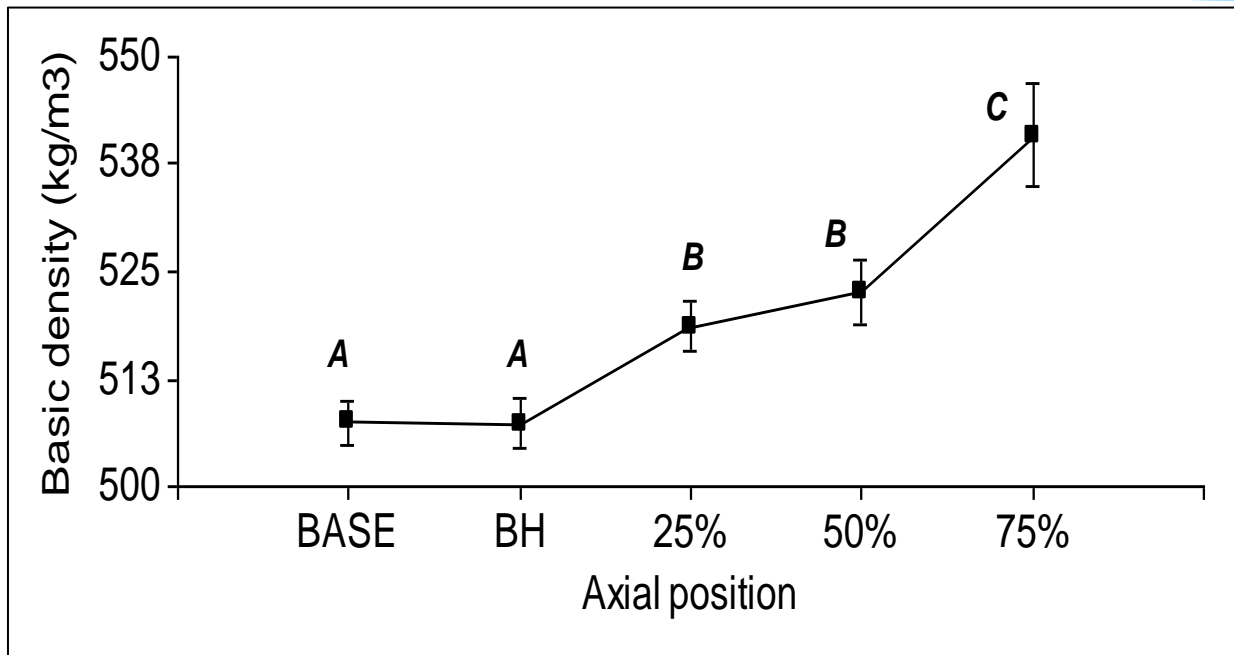
$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Sitio}_i + \text{Árbol}_{j(i)} + \text{Posición axial}_k + \text{Orientación}_l + \text{Posición radial}_m + e_{ijkl}$$

*Resultados de ANOVA para la densidad básica*

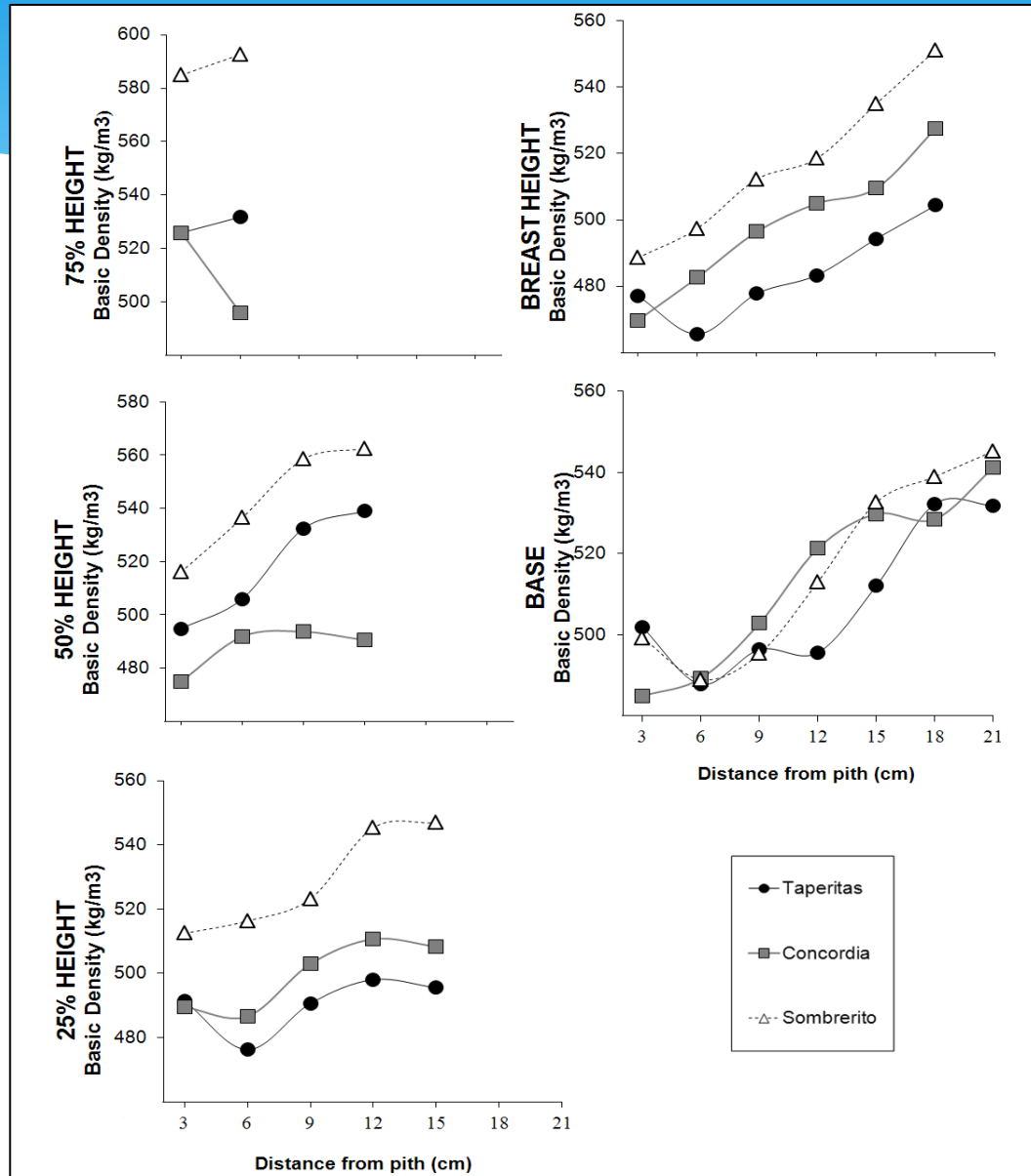
Fuente de variación	p-valor
Sitio ( $S_i$ )	$p < 0,01$
Árbol ( $T_{j(i)}$ )	$p < 0,01$
Orientación cardinal ( $O_l$ )	$p = 0,99$
Posición axial ( $H_k$ )	$p < 0,01$
Posición radial ( $R_m$ )	$p < 0,01$

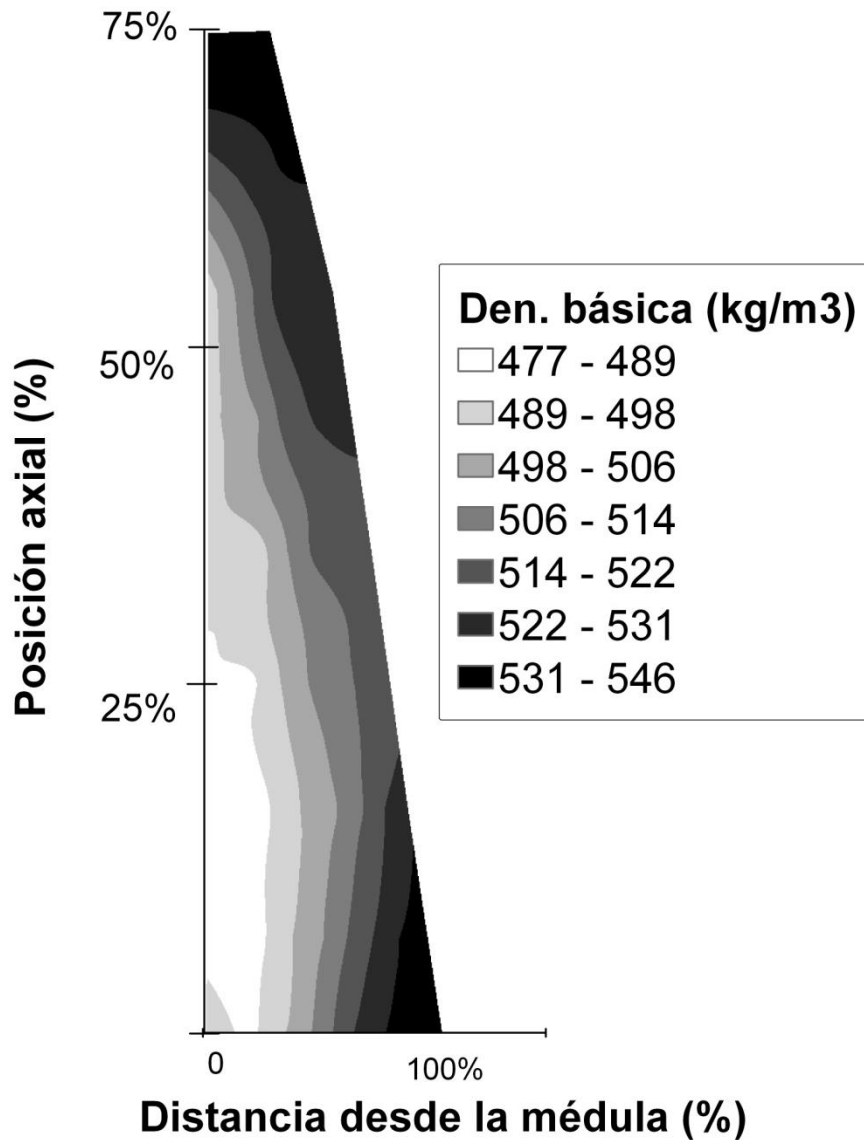
## b) Gráficos de densidad básica en función de la posición axial y de la posición radial

### Variación axial de la densidad básica



# Variación radial de la densidad básica





Incremento del 14%

## c) Componentes de la varianza de la densidad básica

$$Y_{ijkl} = \mu + \text{Árbol}_i + \text{Posición axial}_{j(i)} + \text{Orientación}_{k(ij)} + \text{Posición radial}_{l(ijk)} + e_{ijkl}$$

Fuentes de variación	Varianza	(%)
Árbol ( $T_i$ )	778,4	42,6
Posición axial ( $H_{j(i)}$ )	261,5	14,3
Orientación cardinal ( $O_{k(ij)}$ )	126,6	6,9
Posición radial ( $R_{l(ijk)}$ )	562,6	30,8
Error ( $e_{ijkl}$ )	99,4	5,4

52

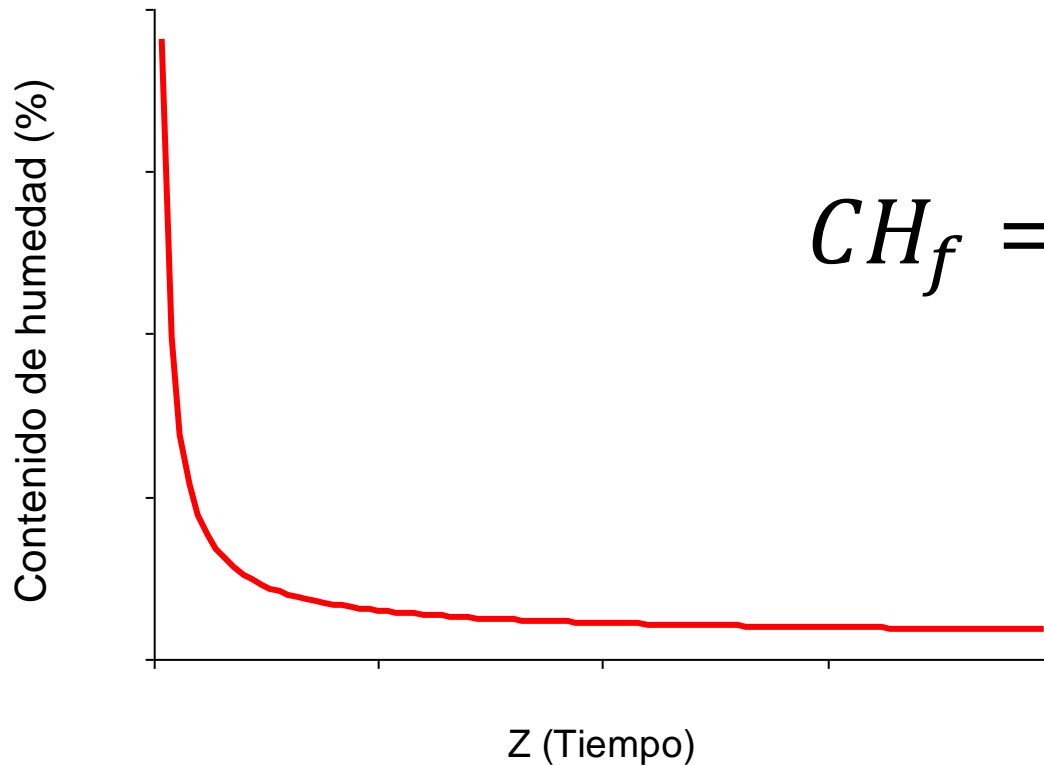
# Conclusiones

- La densidad de la madera a la altura del pecho mostró una alta asociación con la densidad de la madera promedio del árbol completo y explicó el 81,2 % de la variabilidad de la densidad del árbol completo
- La densidad básica en el fuste del árbol aumentó en dirección radial desde la médula en sentido hacia la corteza y en la dirección axial desde la base hasta el 75% de la altura total. El incremento promedio en las direcciones radial y axial fue de 14%. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas para las posiciones radiales y axiales analizadas.
- La variabilidad de la densidad básica de la madera fue mayor dentro del fuste del árbol que entre árboles: 52% de la variación total correspondió al fuste del árbol y un 42,6% correspondió a variación entre árboles. En el fuste la variación radial duplicó a la variación axial y la variación axial duplicó a la variación de la orientación cardinal.



## B) Estudio del **secado** en cámara de la madera de *Grevillea robusta*

La velocidad de difusión aumenta parabólicamente con el contenido de humedad



$$CH_f = CH_i e^{-\alpha Z} \quad (1)$$

## Ecuación de Kollmann para estimar tiempo de secado

$$Z = \frac{1}{a} \ln \left( \frac{CH_i}{CH_f} \right) \left( \frac{ESP}{25} \right)^a \left( \frac{65}{TBS} \right)^b$$

$Z$ : Tiempo de secado (horas)

$\alpha$ : Coeficiente que define la madera y el equipo de secado

$CH_i$ : Contenido de humedad inicial(%)

$CH_f$ : Contenido de humedad final (%)

$ESP$ : Espesor (mm)

$TBS$ : Temperatura del bulbo seco (°C)

$a$ : Exponente

$b$ : Exponente

## Objetivo

El objetivo del trabajo fue desarrollar y evaluar el desempeño de la ecuación de Kollmann en el secado en cámara de *Grevillea robusta*

# Material es y métodos

- \* Cámara de mampostería
- \* Capacidad 15 m<sup>3</sup>
- \* Sistema de calefacción: Radiadores con vapor saturado
- \* Sistema de humidificación: Vapor saturado
- \* Sistema de ventilación: Ventiladores axiales (vel 4 m/s)
- \* Medición del contenido de humedad: Sensores conductivos



## 1) Control del contenido de humedad:

Método gravimétrico con probetas

**PROBETAS** con 3 niveles de espesor

25 mm  
38 mm  
50 mm

100 mm x 500 mm

5 probetas por espesor (n=15 por ensayo)

## 2) Control de la calidad de secado en tablas:

Determinación de defectos al final del secado:

- Alabeos (Arquedura, acanaladura, encorvadura y torcedura)
- Grietas

**TABLAS** con 3 niveles de espesor

25 mm  
38 mm  
50 mm

100 mm x 2000 mm

10 tablas por espesor (n=30 por ensayo)

	Tiempo (hs)	TBS (°C)	TBH (°C)	H.R. (%)	H.E.H. (%) <sup>1</sup>
<b>Programa 1</b> (ensayo 1)	0-48	46	43	83	16
	48-120	49	42	71	11,7
	120-192	51	43	62	9,9
	192-240	53	45	61	9,3
	240-264	55	45	53	8
<b>Programa 2</b> (ensayo 2)	0-48	45	43	88,5	18,2
	48-96	48	43	74	12,7
	96-144	51	43	62	9,8
	144-240	54	43	52	7,9
	240-288	57	43	43,5	6,6
	288-336	60	43	37,5	5,2
<b>Programa 3</b> (ensayo 3)	0-96	48	40	61	9,8
	96-144	52	40	48	7,5
	144-216				
		55	40	38	6,2



Vista lateral del secadero



Carga de madera a secar



Probeta en balanza



Controladores del horno

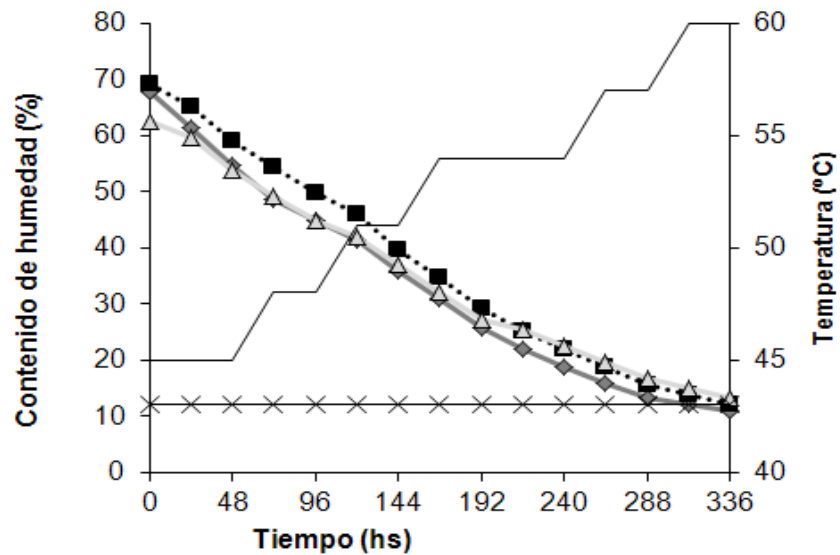


CHf=12%





## Ensayo 2



## Referencias

- ◆ 25,4 mm
- 38,1 mm
- △ 50,8 mm
- TBS
- × TBH

## 1) Calibración-Validación del modelo de Kollmann

519 observaciones (registros)

70% datos de calibración (n=360)

30% datos de validación (n=159)

## 2) Determinación de calidad de secado con norma NCh 992.EOf7

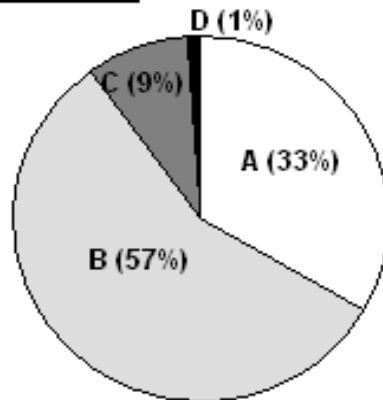
# Resultados

		Calibración	Validación
		Estimador (error)	Estimador (error)
Parámetros	$\alpha$	0,016 (0,0013) **	0,023 (0,0029) **
	a	0,13 (0,032) **	0,13 (0,048) **
	b	4 (0,32) **	5,25 (0,50) **
Residuos	Em	7,3	8,2
	E	20,8	22
	ECM	721	845
Ajuste	SS	26,8	29
	R <sup>2</sup>	91,7	90,1

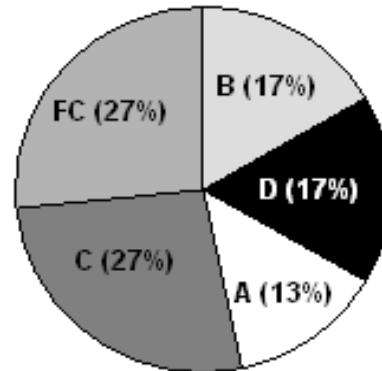
\*\* Estadísticamente significativo al 0,01

# Frecuencia de defectos encontrados según norma

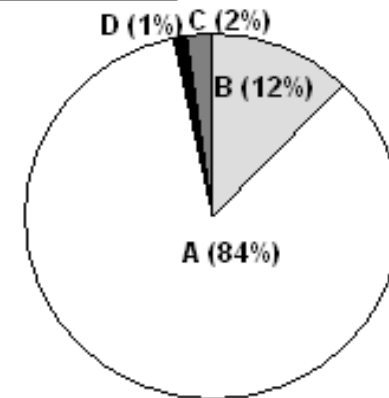
Arqueadura



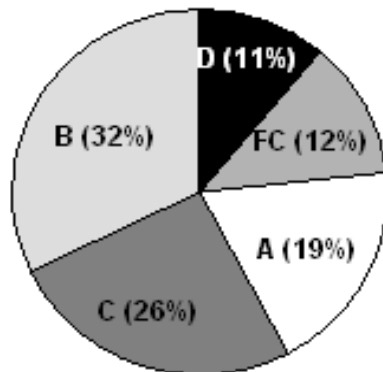
Encorvadura



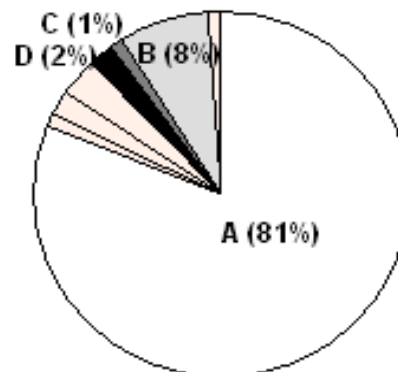
Acanaladura



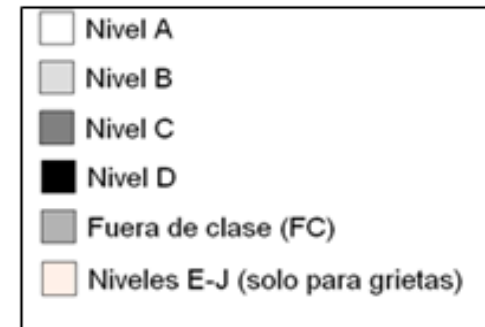
Torcedura



Grietas



Referencias



## Conclusiones

- 1) La ecuación de Kollmann permitió estimar en forma aproximada los tiempos de secado de *Grevillea robusta* en cámara en función de las variables contenido de humedad (inicial y final), espesor de tabla y temperatura del bulbo seco.
- 2) La calidad de secado se consideró buena para las condiciones psicrométricas empleadas.

## Ecuación de Kollmann para estimar tiempo de secado

$$Z = \frac{1}{0,016} \ln \left( \frac{CH_i}{CH_f} \right) \left( \frac{ESP}{25} \right)^{0,13} \left( \frac{65}{TBS} \right)^4$$

Variable	Rango de variación
Contenido de humedad (%)	80 - 12
Temperatura del bulbo seco (°C)	45 - 60
Espesor (mm)	25,4 - 50,8
Velocidad del aire (m/s)	4

# Aplicaciones prácticas

## Ejemplo : Estimación del tiempo de secado

Se desea conocer el tiempo aproximado necesario para que tablas de madera de *Grevillea robusta* de una pulgada y media, alcancen un CH=50%, si parten de un CH=70% y la temperatura aplicada es de 52°C hasta el CH de 60% y luego la temperatura aumenta 4°C.

$$Z = \frac{1}{0,016} \ln \left( \frac{CH_i}{CH_f} \right) \left( \frac{ESP}{25} \right)^{0,13} \left( \frac{65}{TBS} \right)^4$$

$$Z = \frac{1}{0,016} \ln \left( \frac{70}{60} \right) \left( \frac{38}{25} \right)^{0,13} \left( \frac{65}{52} \right)^4 = 24,84 \text{ hs}$$

$$Z = \frac{1}{0,016} \ln \left( \frac{60}{50} \right) \left( \frac{38}{25} \right)^{0,13} \left( \frac{65}{56} \right)^4 = 21,84 \text{ hs}$$

46,68 hs ( $\approx$  2 días)

## Aplicaciones prácticas

### Ejemplo 2: Estimación del contenido de humedad

Se desea conocer el contenido de humedad de tablas de una pulgada de espesor cuando han transcurrido 40 hs de iniciado el secado con una temperatura del bulbo seco de 50°C y la madera ingresó con un CH=60%

$$CH_f = CH_i e^{-0,016 * Z \left(\frac{25}{ESP}\right)^{0,13} \left(\frac{TBS}{65}\right)^4} = 48 \%$$

$$CH_f = 60 e^{-0,016 * 40 \left(\frac{25}{25}\right)^{0,13} \left(\frac{50}{65}\right)^4} = 48 \%$$

*Programa de secado para tablas de 1 pulgada de espesor*

Tiempo (hs)	CH (%)	TBS (°C)	TBH (°C)
107	80-50	47	45
185	50-30	52	45
289	30-12	56	45

*Programa de secado para tablas de 1,5 pulgadas de espesor*

Tiempo (hs)	CH (%)	TBS (°C)	TBH (°C)
70	80-60	47	45
146	60-40	50	45
192	40-30	52	45
253	30-20	53	45
314	20-12	55	45



# Muchas gracias

**Ing. Ftal. Pabla Yolanda GENES**

E-mail: genes.pabla@inta.gob.ar

**Ing. Ftal. Mariano Agustín HERNANDEZ**

E-mail: hernandez.mariano@inta.gob.ar

**Ing. Ftal. Esteban ARIAS**

E-mail: estebanarias54@yahoo.com.ar

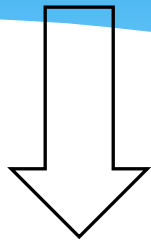
**Ing. Agr. (M. Sc.) Juan Adolfo LOPEZ**

E-mail: lopez.juanadolfo@inta.gob.ar

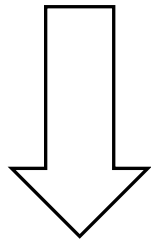


ANEXO

$$CH_f = CH_i e^{-\alpha Z} \quad (1)$$

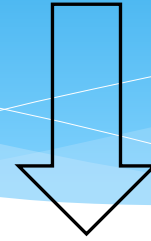


$$CH_i = CH_f e^{\alpha Z} \quad (2)$$

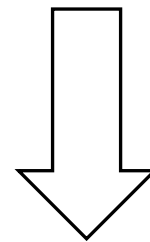


$$e^{\alpha Z} = \frac{CH_i}{CH_f} \quad (3)$$

$$\alpha Z = \ln \frac{CH_i}{CH_f} \quad (4)$$



$$Z = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{CH_i}{CH_f} \right) \quad (5)$$



$$Z = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{CH_i}{CH_f} \right) f_n \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{TBS_1}{TBS_2} \right)^a$$

$$f_2 = \frac{Z_1}{Z_2} = \left( \frac{ESP_2}{ESP_1} \right)^b$$