

COMPARACIÓN DE LA ANISOTROPÍA DIELECTRICA DE LA  
MADERA EN LAS CONÍFERAS Y FRONDOSAS POR MEDIO DE LA

**TÉCNICA NO DESTRUCTIVA DEL GEORRADAR  
CON UNA ANTENA DE 2 GHz**

## OBJETIVOS CONCRETOS

```
graph TD; A[OBJETIVOS CONCRETOS] --- B[Conocer la naturaleza, propiedades y clasificación de la madera.]; A --- C[Conocer el fundamento teórico del Georradar.]; A --- D[Conocer los elementos que forman el equipo.]; A --- E[Conocer el software para la interpretación de resultados.];
```

Conocer la naturaleza, propiedades y clasificación de la madera.

Conocer el fundamento teórico del Georradar.

Conocer los elementos que forman el equipo.

Conocer el software para la interpretación de resultados.

# NATURALEZA DE LA MADERA

## Estructura macroscópica

- Se puede observar a simple vista.

## Estructura microscópica

- Es visible con unos 2000 aumentos.

## Estructura ultramicroscópica

- Es visible con unos 3000 aumentos.

# PROPIEDADES DE LA MADERA

## Propiedades físicas

- Anisotropía, densidad, contenido de humedad y propiedades eléctricas.



## Propiedades mecánicas

- Resistencia a la compresión y resistencia a la tracción.

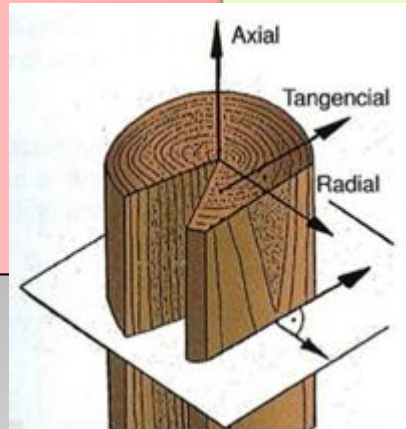


# Propiedades físicas

**Anisotropía:** la madera es un material anisótropo, por ello se considera necesario definir el plano o dirección en el que se va a trabajar.

**Densidad:** la madera tiene una densidad baja y su valor está directamente relacionado con el contenido de humedad.

**Higroscopicidad:** propiedad de la madera relacionada con el contenido de humedad.



**Contenido de humedad:** el agua puede estar contenida en la madera de diferentes formas:

- Agua libre.
- Agua de saturación.
- Agua de constitución.

**Propiedades eléctricas:** las más importantes en el caso de la madera son:

- La conductividad.
- La constante dieléctrica.
- El factor de pérdida.

# Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de la madera se ven influenciadas por el contenido de humedad, la especie y la presencia de defectos y singularidades.

## RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La madera sometida a cargas presenta un comportamiento viscoelástico.

## RESISTENCIA A TRACCIÓN

La madera es muy indicada para trabajar a tracción siempre que el esfuerzo actúe en dirección paralela a las fibras.

# CLASIFICACIÓN DE LAS MADERAS

## Coníferas:

- Procedentes de los árboles que pertenecen al grupo de las gimnospermas.
- De estructura sencilla, ligeras y blandas.
- Muy fáciles de trabajar.

A este grupo pertenece la madera de Pino Ruso.

## Frondosas:

- Procedentes de los árboles que pertenecen al grupo de las angiospermas.
- De estructura compleja.
- Difíciles de trabajar en comparación con las coníferas.
- Se subdividen en: maderas **duras**, blandas, finas, de Guinea y exóticas.

A este grupo pertenece la madera de Haya.

## **NORMA UNE-EN 338-2003: *madera estructural. Clases resistentes.***

Clase resistente madera de Haya: D40 → 40 MPa

Clase resistente madera de Pino Ruso: C14 → 14 MPa

## CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE HAYA Y LA MADERA DE PINO RUSO

CARACTERÍSTICAS	HAYA	PINO RUSO
<b>COLOR MADERA</b>	Blanquecina al cortarla y va adquiriendo un color rojizo claro.	Grisáceo.
<b>COLOR ALBURA</b>	Va del anaranjado al rosa claro.	Amarillo pálido.
<b>COLOR DURAMEN</b>	Del blanco anaranjado al rosa claro.	Rojizo.
<b>DIFERENCIA ENTRE ALBURA Y DURAMEN</b>	Con el tiempo no se diferencian.	Más acusada en la sección transversal.
<b>GRUPO</b>	Frondosas.	Coníferas.
<b>ORIGEN</b>	Centro y Oeste de Europa.	Hemisferio Norte de Europa.
<b>TALLA</b>	35 a 40 m.	< 30 m.
<b>TRONCO</b>	Liso y recto	Recto, cónico hasta su ápice.
<b>COPA</b>	Ovalada.	Cónica.
<b>HOJAS</b>	Ovaladas, con el borde ondulado, algo dentado. Alternas.	Simple, agrupadas de a dos, aciculares, rígidas, punzantes y cortas.
<b>FLORES</b>	Masculinas y femeninas.	Conos de forma oblonga.
<b>FRUTOS</b>	Hayucos.	
<b>CLIMA</b>	Fresco y húmedo.	Muy frío.
<b>CRECIMIENTO</b>	Lento. Tardan décadas en alcanzar el grado de madurez para poder ser cortadas.	Rápido.
<b>ANILLOS</b>	Discernibles.	Muy marcados en la madera de verano.
<b>DUREZA</b>	Dura.	Blanda.



## PROPIEDADES FÍSICAS DE LA MADERA DE HAYA Y LA MADERA DE PINO RUSO

PROPIEDADES FÍSICAS	HAYA	PINO RUSO
DENSIDAD APARENTE AL 12% DE HUMEDAD	730 Kg/m <sup>3</sup> (Pesada).	540 Kg/m <sup>3</sup> (Semiligera).
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN VOLUMÉTRICO	0,51% (Madera estable).	0,38% (Madera nerviosa).
RELACIÓN ENTRE CONTRACCIONES	2,05%	1,81%
DUREZA (Monnin)	4	1,9

## PROPIEDADES MECÁNICAS DE LA MADERA DE HAYA Y LA MADERA DE PINO RUSO

PROPIEDADES MECÁNICAS	HAYA	PINO RUSO
RESISTENCIA A FLEXIÓN ESTÁTICA	40.000.000 Pa	14.000.000 Pa
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	56.840.000 Pa	39.788.000 Pa
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PARALELA	117.600.000 Pa	99.960.000 Pa

## MECANIZACIÓN DE LA MADERA DE HAYA Y LA MADERA DE PINO RUSO

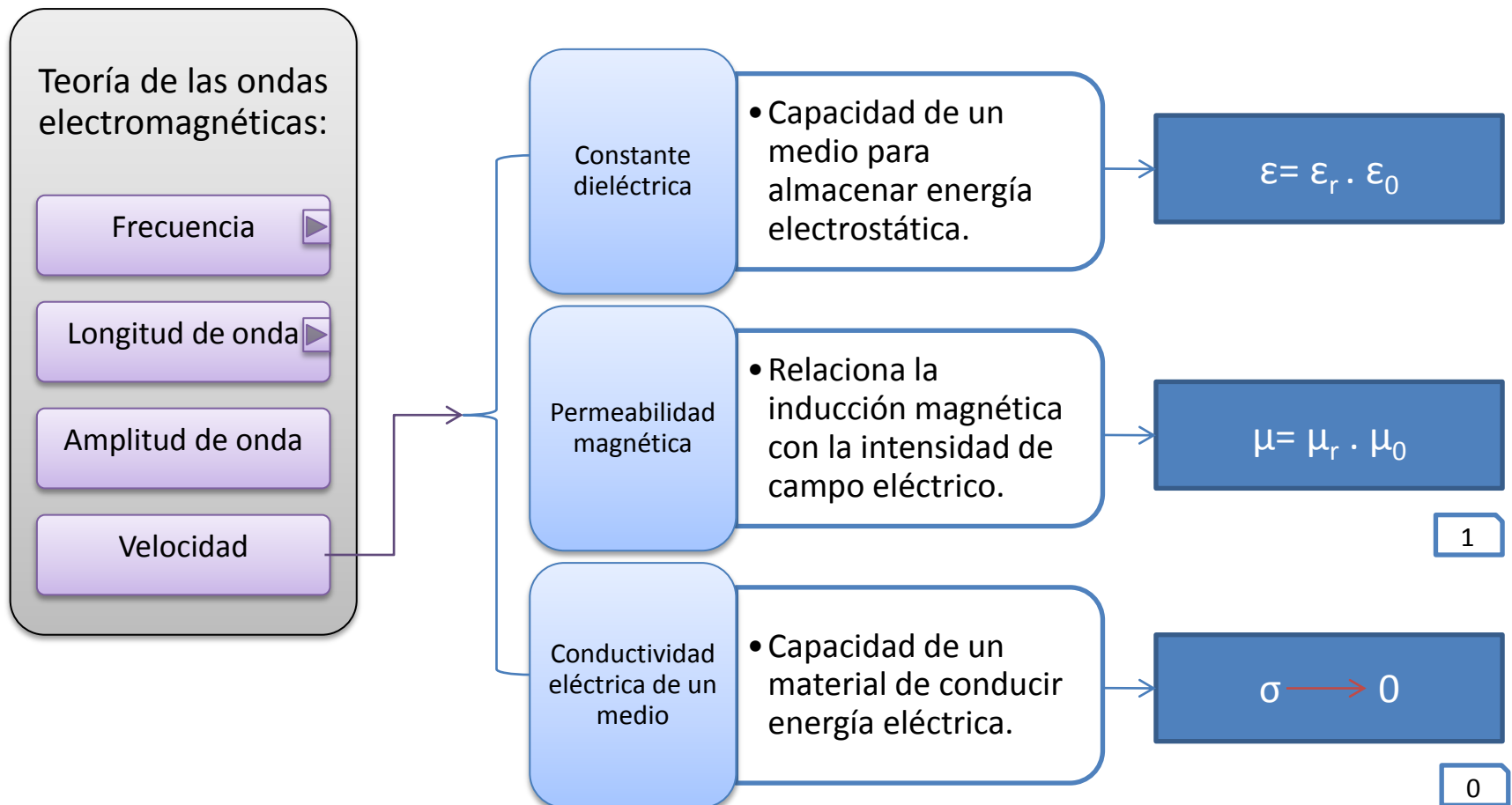
MECANIZACION	HAYA	PINO RUSO
ASERRADO	3	1,5
SECADO	3	1
CEPILLADO	1,5	1
ENCOLADO	1	1
CLAVADO Y ATORNILLADO	1,5	1
ACABADO	1	1,5

## PRECIOS DE LA MADERA DE HAYA Y LA MADERA DE PINO RUSO

PRECIOS	HAYA	PINO RUSO
<b>Redondos</b>		
60 mm	9,90 €/ml	1,35 €/ml
80 mm	11,2 €/ml	2,30 €/ml
100 mm	13,6 €/ml	3,60 €/ml
120 mm	15,9 €/ml	5,30 €/ml
140 mm	16,4 €/ml	7,50 €/ml
<b>Tablero</b>		
800 X 200 X 18-19mm	8,10 €	5,05 €
1200 x 200 x 18-	13,20 €	6,10 €
800 x 300 x 18-	18,30 €	6,10 €

# FUNDAMENTO DE LA TEORÍA DEL GEORRADAR

Es un método de prospección geofísica basado en la emisión de impulsos electromagnéticos de corta duración en la banda de frecuencias de UHF-VHF.

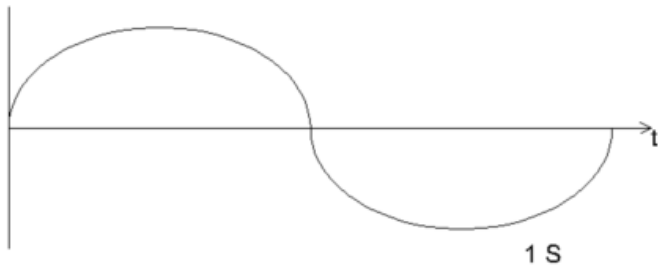


# Frecuencia de una onda

Responde a un fenómeno físico que se repite cíclicamente un número determinado de veces durante 1 segundo. Su unidad de medida es el ciclo por segundo o Hz.

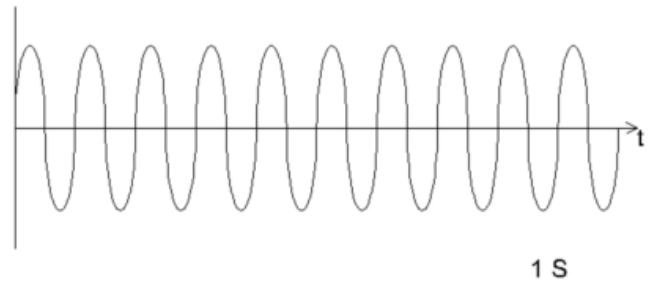
Onda A

Frecuencia ( $f$ ) = 1 Hz o ciclo/s



Onda B

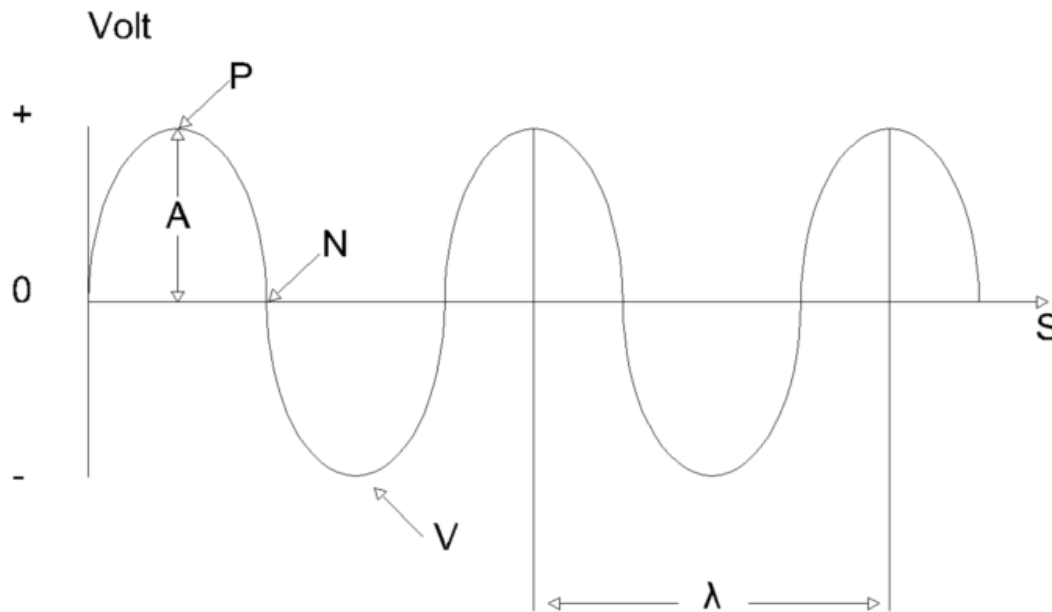
Frecuencia ( $f$ ) = 10 Hz o ciclo/s



# Longitud de onda

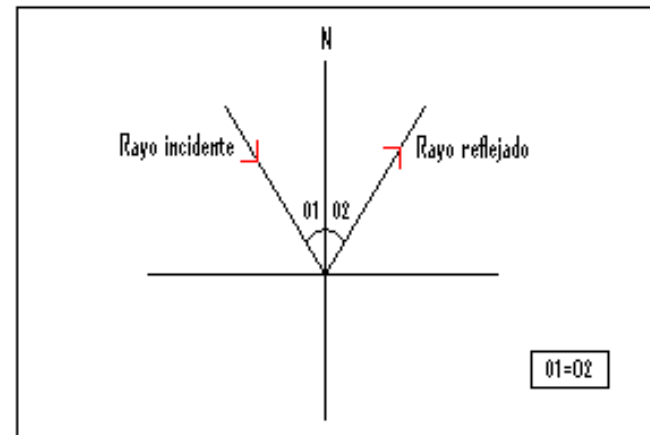
Distancia horizontal existente entre dos picos consecutivos, dos valles consecutivos o dos veces la distancia existente entre un nodo y otro de la onda electromagnética.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

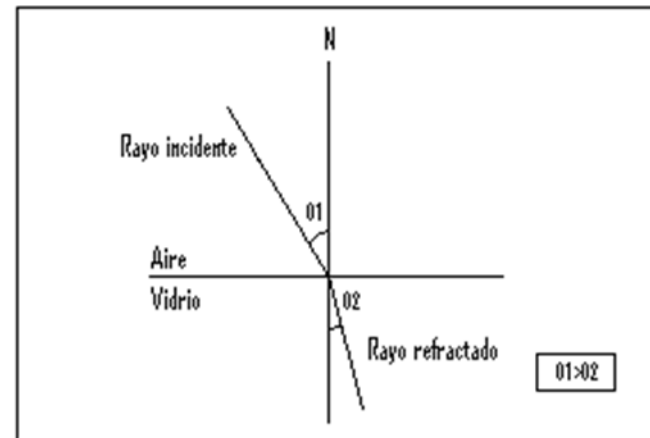


# Fenómenos de reflexión y refracción

**Reflexión:** se produce cuando una onda encuentra una separación entre dos medios y retrocede hacia el mismo medio del cual provenía.



**Refracción:** se produce cuando una onda encuentra una separación entre dos medios y pasa al segundo medio.



# Análisis del cambio de polaridad de las ondas

Importante para casos en los que resulta difícil identificar las reflexiones producidas.

El cambio de polaridad que experimenta una onda se produce cuando ésta se transmite de un material con una determinada constante dieléctrica a otro cuya constante dieléctrica es diferente.

Reflector metálico



Permite identificar el punto en el que se produce el cambio de polaridad.



Garantizando que las reflexiones observadas en los radargramas son las producidas en las interfases

# EQUIPO DE GEORRADAR

Unidad de control



Antena

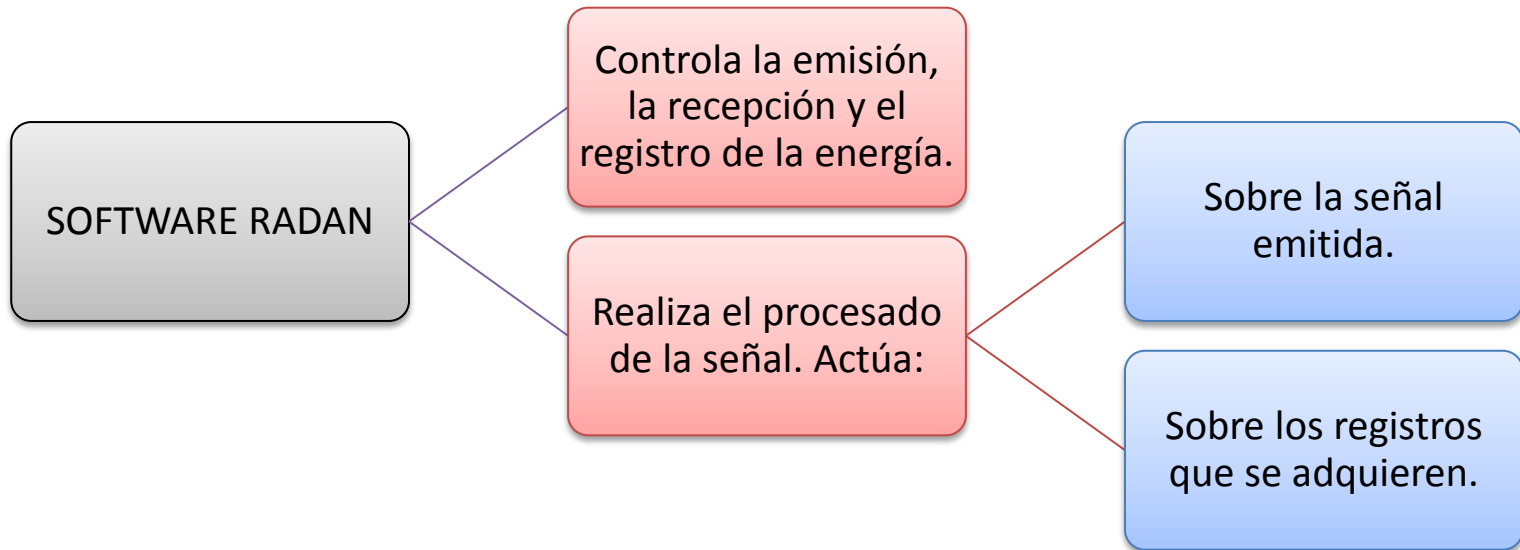


Radargrama



# Unidad de control

Las señales recibidas son digitalizadas y almacenadas.



**Modelo:** SIR 3000.

**Peso:** 4,5 Kg.

**Dimensiones:** 31,5 x 22 x 10,5 cm.



### Características

Gran capacidad de almacenamiento de datos.

Capacidad para mostrar imágenes en 3D.

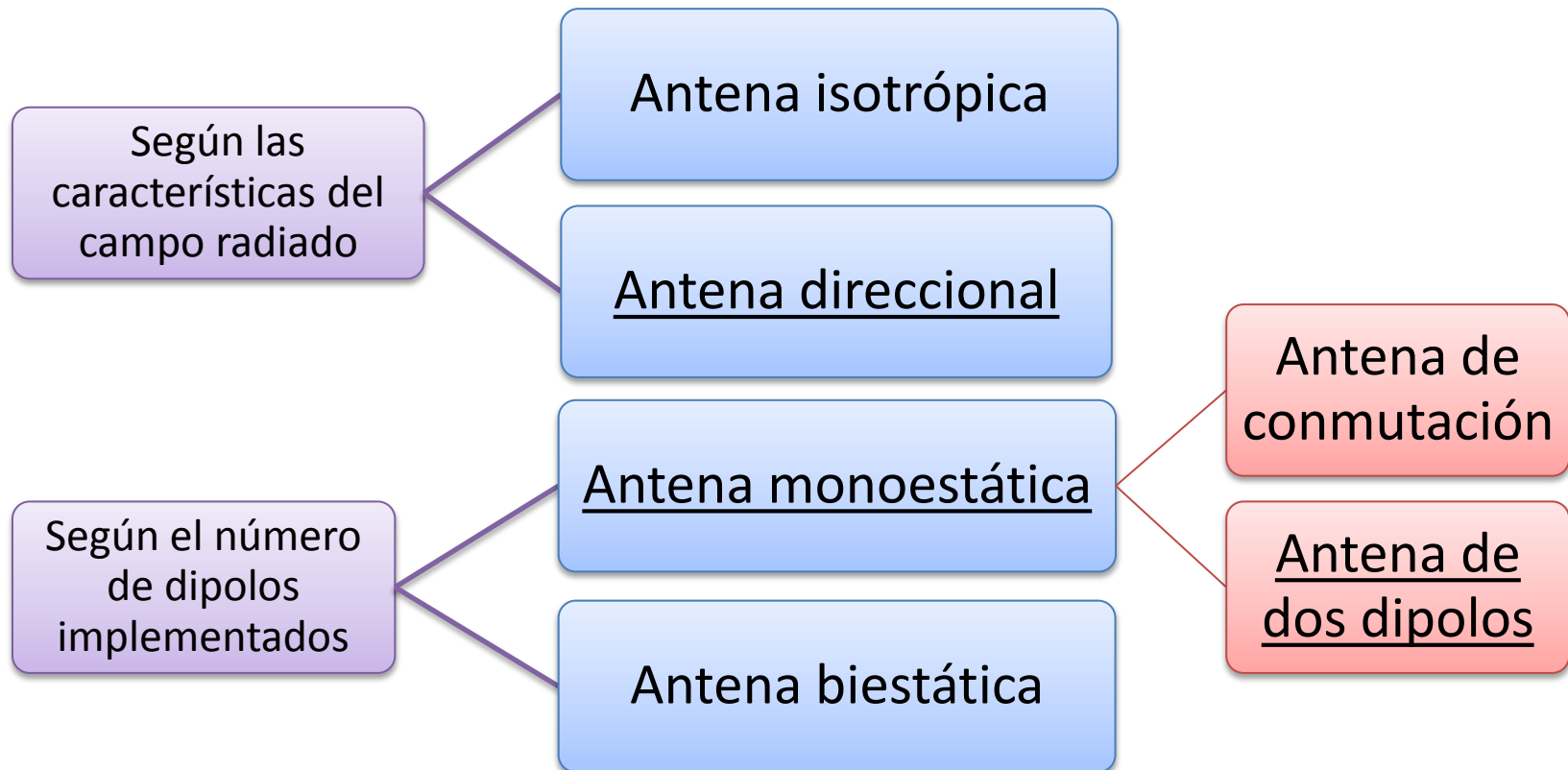
Portátil.

Ligero.

Resistente al agua.

# Antena

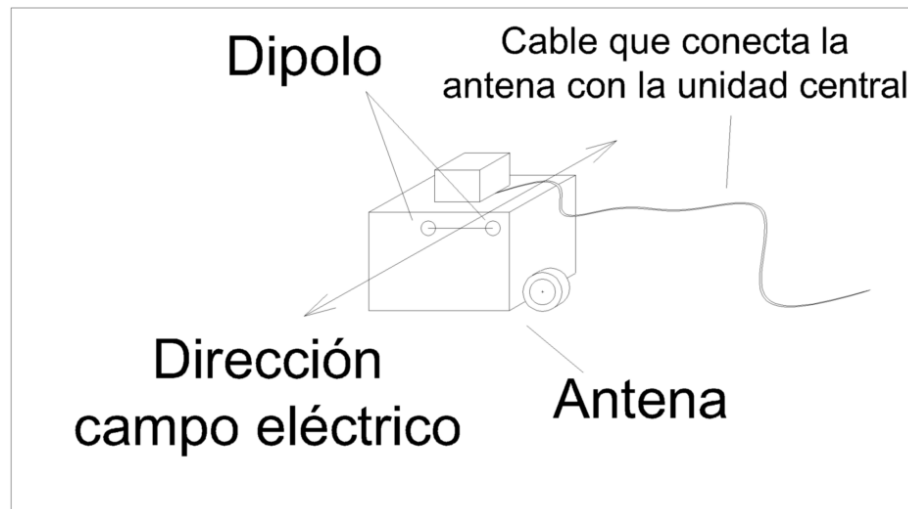
Encargada de emitir el pulso electromagnético al medio y recibir la energía que regresa a la superficie tras haber sufrido una reflexión.



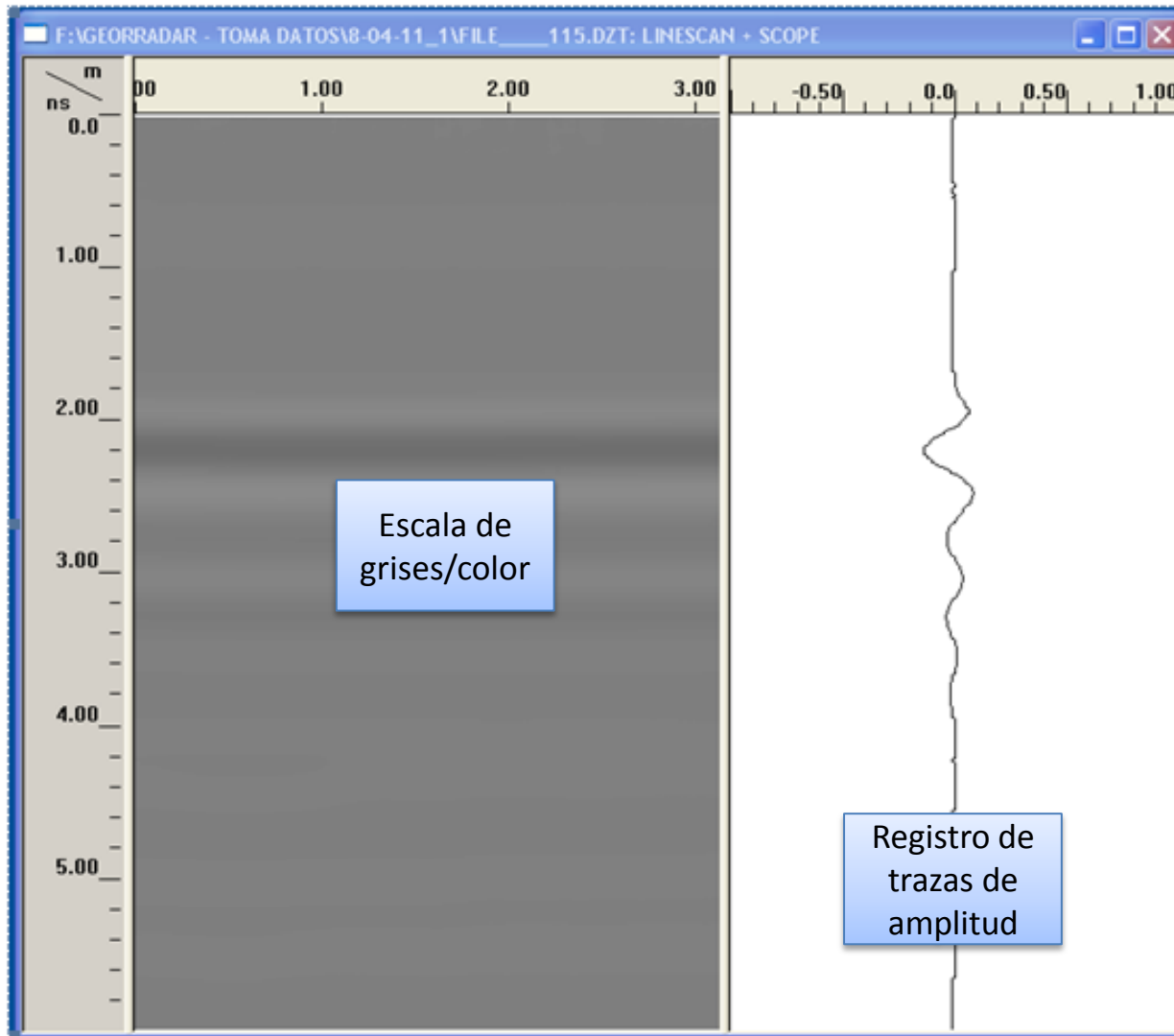
**Modelo:** 4105.  
**Frecuencia:** 2GHz.  
**Rango de penetración:** 0-0,75 m.  
**Peso:** 7,3 Kg.  
**Dimensiones:** 21 x 55,6 x 49,5 cm.



La dirección del campo eléctrico determina la dirección de realización de los ensayos.



## Formas de visualización del radargrama



## Parámetros que definen el radargrama

### RANGO

Tiempo durante el cual se registra la llegada de ondas a la antena.

(ns)

### VALOR DE GANANCIA

Valor que se aplica para ver amplificadas las ondas.

(adimensional)

### Nº TRAZAS/SEGUNDO

Dependiendo del número de trazas por segundo se obtiene mejor o peor resolución.

(scans/s)

### POSICIÓN INICIAL

Posición inicial a partir de la cual se empieza a registrar los datos que llegan a la antena.

(ns)

## Parámetros que definen el radargrama

The image shows a software dialog box titled "Edit File Header" with various configuration options. Red boxes and arrows highlight specific parameters:

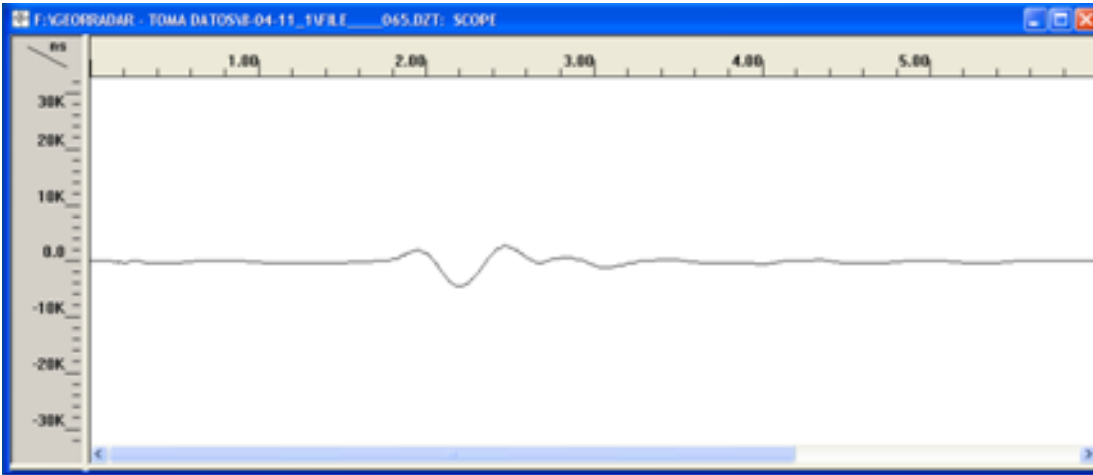
- TRAZAS/SEGUNDO**: Points to the "samp/scan" field, which is set to 512.
- POSICIÓN INICIAL**: Points to the "Position (nS)" field, which is set to 0.
- RANGO**: Points to the "Range (nS)" field, which is set to 6.
- VALOR DE GANANCIA**: Points to the "Range Gain (dB)" field, which is set to 5.0.

Other visible parameters include:

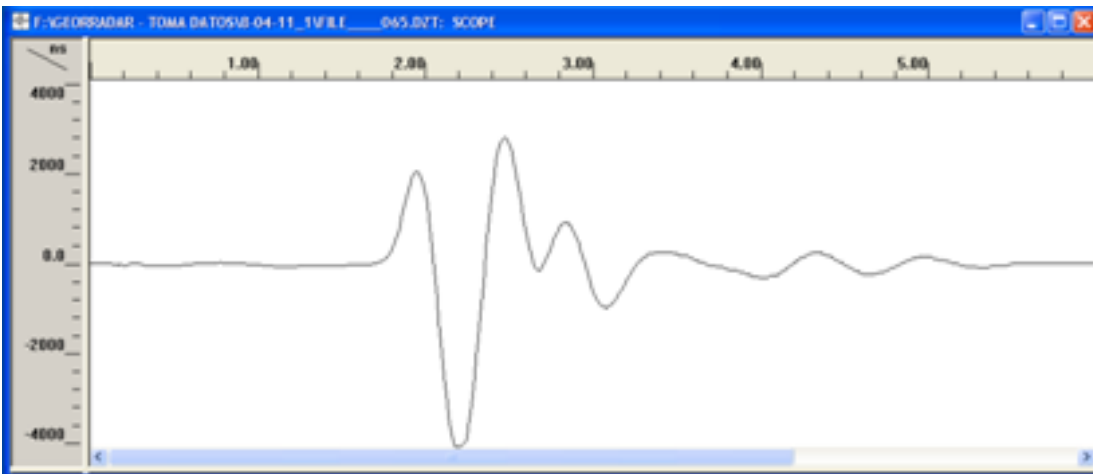
- FILE NAME: FILE\_00
- Created: Apr, 11 2011, 16:14:06
- Modified: Apr, 11 2011, 16:14:12
- Channel(s): 1
- Channel Information: Channel 1, Antenna 1.5/1.6GHZ, Comp T1R1
- bits/sample: 16
- scans/sec: 100
- scans/ m: 120
- m /mark: 0
- DielConstant: 6
- Position Correction: -14.225 nS
- Vert IIR LP N =1 F =2700 MHz
- Vert IIR HP N =1 F =500 MHz
- Horz IIR Stack TC =20
- Top (m): -0.0537541
- Depth (m): 0.367423

Buttons at the bottom: Save, Save As, Export Header, Cancel, Help.

## Interpretación posterior de la imagen



Sin aplicar  
valor de  
ganancia



Las amplitudes  
quedan  
modificadas

Aplicando  
valor de  
ganancia



# ENSAYOS CON GEORRADAR

## Consideraciones previas

Cálculo  
densidad

Cálculo  
contenido  
humedad

Cálculo densidad madera:

- Se ha aplicado a 3 probetas en el caso de la madera de Pino Ruso y a 2 probetas de la madera de Haya.
- Posteriormente se saca la media de las densidades para cada madera.

$$D = \frac{m}{V}$$

## Cálculo contenido de humedad:

El procedimiento para el cálculo de humedad es el especificado en la norma “UNE-EN 13.183-1”, consistente en:

Tomar una muestra que incluya toda la sección de la pieza sometida a ensayo (grosor mínimo de 20 mm). La muestra no debe ser de madera resinosa, o incluir irregularidades tales como corteza, nudos o bolsas de resina.

Pesar la muestra inmediatamente después de haberla tomado.

Secar la muestra pesada a una temperatura de  $103 \pm 2$  °C, hasta que la diferencia de masa entre dos pesadas sucesivas realizadas en un intervalo de 2 horas sea menor del 0'1 %.

Realizar la pesada de la masa seca inmediatamente después de sacar la muestra de la estufa.

Posteriormente se aplica la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100$$

$m_1$ = masa de la muestra antes de secar (kg).

$m_0$ =masa de la muestra anhidra (kg).

$\omega$ = contenido de humedad en tanto por ciento.

## TABLA CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE PINO RUSO

MADERA	PROBETA	a (cm)	b (cm)	l (cm)	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
RUSO	1	9.5	7.5	22.5	730.94	661.46	10.50	456.00
	2	9	7.5	22.5	657.87	594.10	10.73	433.00
	3	9	7.5	22.5	764.78	694.06	10.19	500

MEDIA:            10.47            463

## TABLA CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE HAYA

MADERA	PROBETA	a (cm)	b (cm)	l (cm)	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	HUMEDAD (%)	DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> )
HAYA	1	5.7	7.7	20.7	771.70	696.11	10.86	849.40
	3	5.7	7.7	21.5	735.70	660.87	11.33	779.65

MEDIA:            11.10            814.52

# Metodología

PREPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS PROBETAS

COLOCACIÓN PROBETAS

CALIBRACIÓN EQUIPO:  
GEORRADAR

MEDICIONES



# Preparación y características probetas

## Cortado y clasificación probetas:

Selección madera.

Obtención probetas, medidas estandarizadas para todas las probetas.

Comprobación medidas.

Enumeración de las distintas probetas a emplear

### Probeta madera de Haya:

Dimensiones variables tanto en longitud como en ancho de la probeta:  
espesor constante=8 cm.

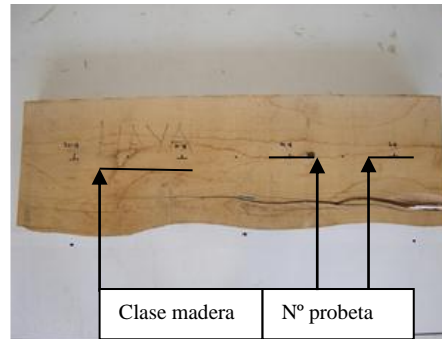
Nº probetas: 15 probetas

Probetas de medida variable debido a la geometría y dureza de la madera, y a los medios de corte disponibles en el laboratorio, resultando imposible cortar las probetas, hecho que impide la realización de mediciones en canto y testa.

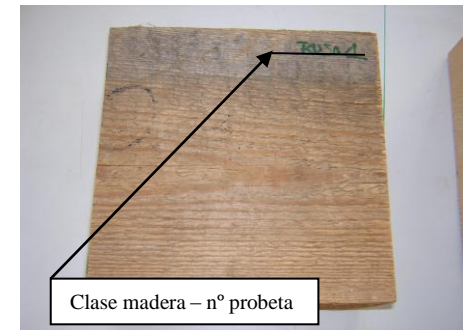
### Probeta madera de Pino Ruso:

22 x 22 x 7,5 cm

Nº probetas: 20 probetas



Probeta madera de Haya



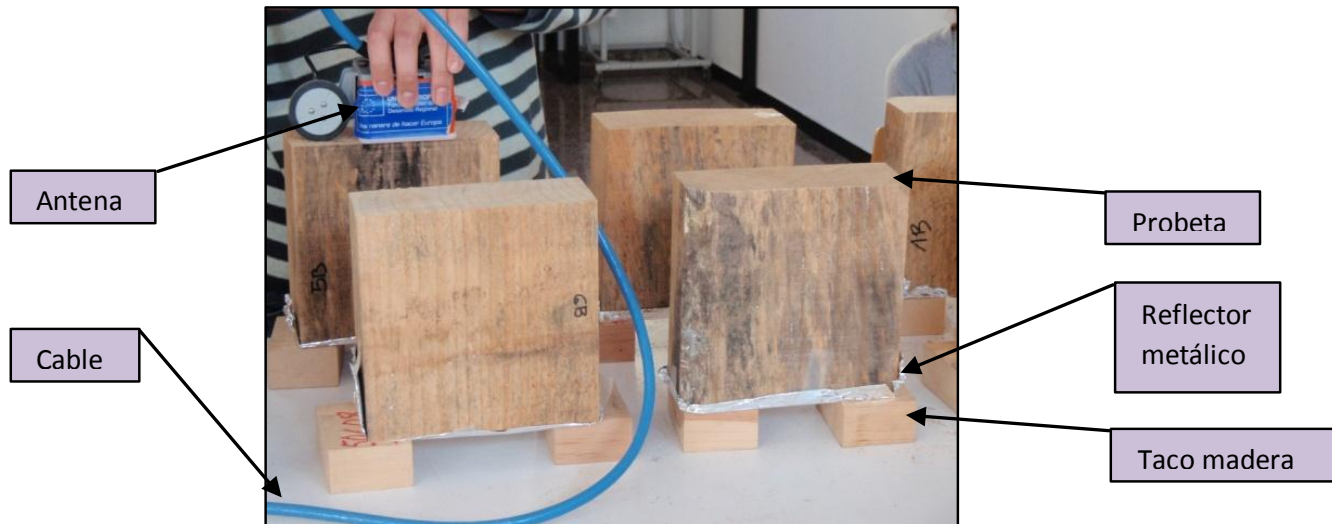
Probeta madera de Pino Ruso

# Colocación probetas

Se disponen todas las probetas apoyadas en tacos sobre una superficie plana.

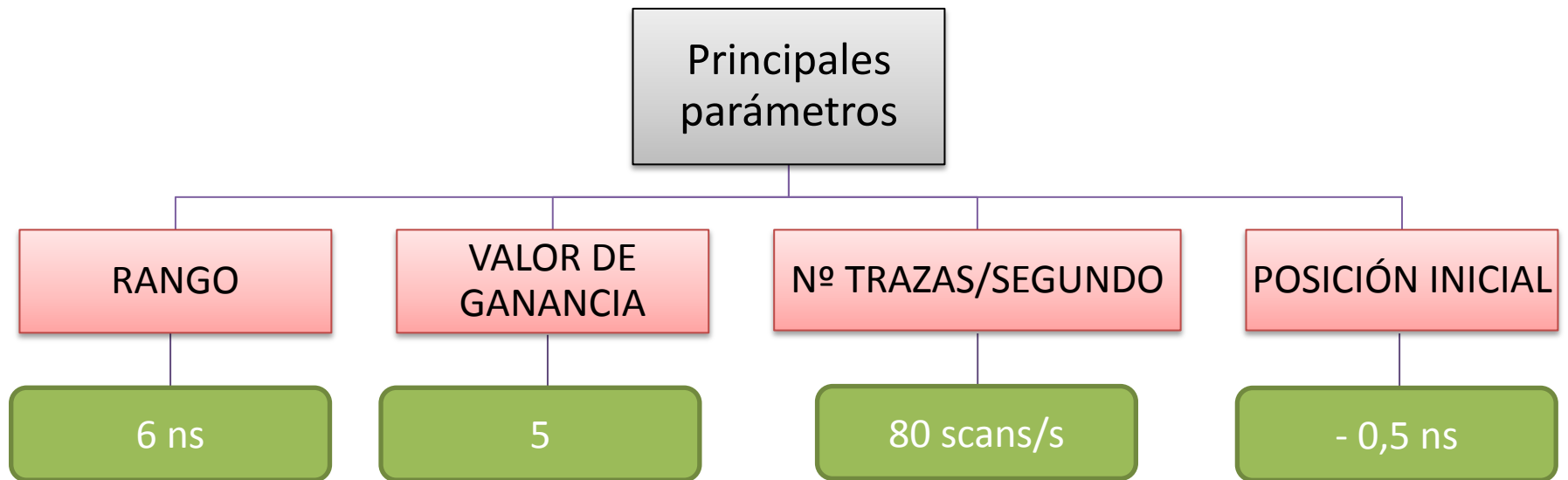
Se alinean las probetas unas junto a otras para facilitar la toma de datos.

Colocación de reflector metálico (cuando se requiera) en la superficie de la probeta que va apoyada sobre los tacos.



# Calibración equipo

Para la calibración del equipo del equipo antes de realizar los ensayos es necesario realizar mediciones previas sobre las probetas para determinar los parámetros más adecuados para la correcta obtención de datos a la hora de realizar los ensayos.



# Mediciones

Mediciones de carácter estático sobre el medio (madera) con y sin reflector metálico.

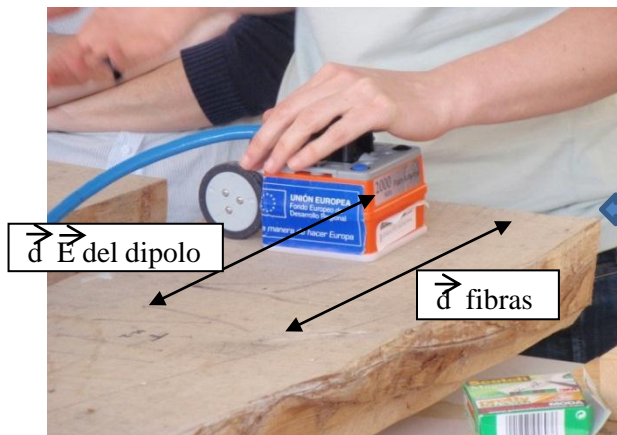
## Posición de la antena en la toma de datos

### CASO 1:

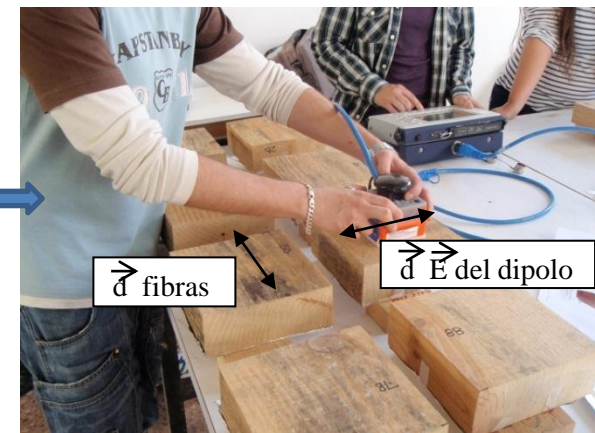
Ensayo longitudinal: campo eléctrico del dipolo de la antena paralelo a las fibras de la madera.

### CASO 2:

Ensayo transversal: campo eléctrico del dipolo de la antena perpendicular a las fibras de la madera.



Con y sin  
reflector  
metálico





# Mediciones

## Solapamiento señales

- Cuando las señales se solapan es porque el tiempo de duración de la onda directa es superior al tiempo que tarda la onda reflejada en recorrer la distancia de ida y vuelta del grosor de la probeta.

## Empleo de reflector metálico

- Para poder comparar registros (con y sin reflector metálico) y diferenciar así cuando se produce el cambio de polaridad de las ondas.

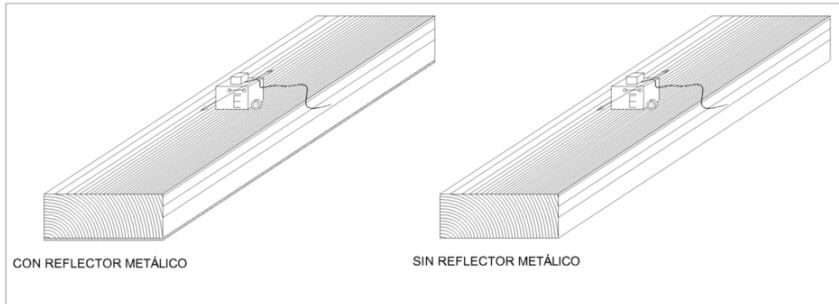
- Para amplificar la reflexión de la onda. Aumentando la reflexión de la onda evitando la refracción de esta en mayor medida, se favorece el cambio de polaridad de la onda.

# Mediciones

## MEDICIONES EN MADERA DE HAYA

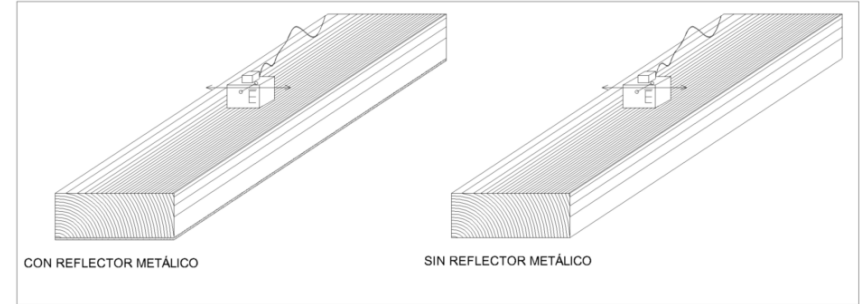
CASO 1:

Ensayo longitudinal (paralelo a las fibras)



CASO 2:

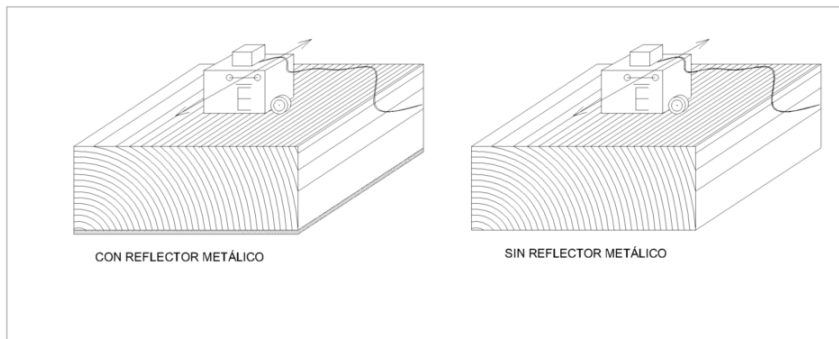
Ensayo transversal (perpendicular a las fibras)



## MEDICIONES EN MADERA DE PINO RUSO

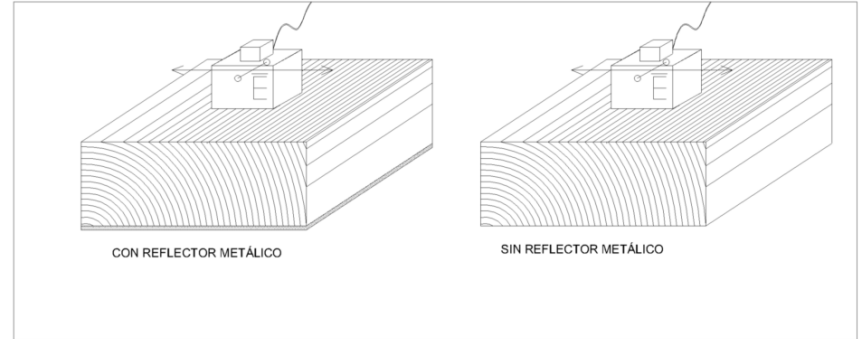
CASO 1:

Ensayo longitudinal (paralelo a las fibras)



CASO 2:

Ensayo transversal (perpendicular a las fibras)



## OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Mediciones



Obtención archivos  
en los ensayos



Análisis y  
procesado archivos  
(Software Radan)

En el análisis y procesado de los archivos obtenidos durante la realización de los ensayos, obtenemos los siguientes parámetros:

PARÁMETROS

Velocidad de propagación de las ondas  
electromagnéticas en el medio (cm/ns)

Constante dieléctrica (valor adimensional)

Amplitud de la onda

# Parámetros

## Velocidad de propagación

- Este valor (cm/ns) se calcula aplicando la siguiente ecuación.

$$v = \frac{2h}{\Delta t}$$

## Constante dieléctrica

- Este valor (no tiene unidades por no ser un valor absoluto) se calcula aplicando la siguiente ecuación.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2$$

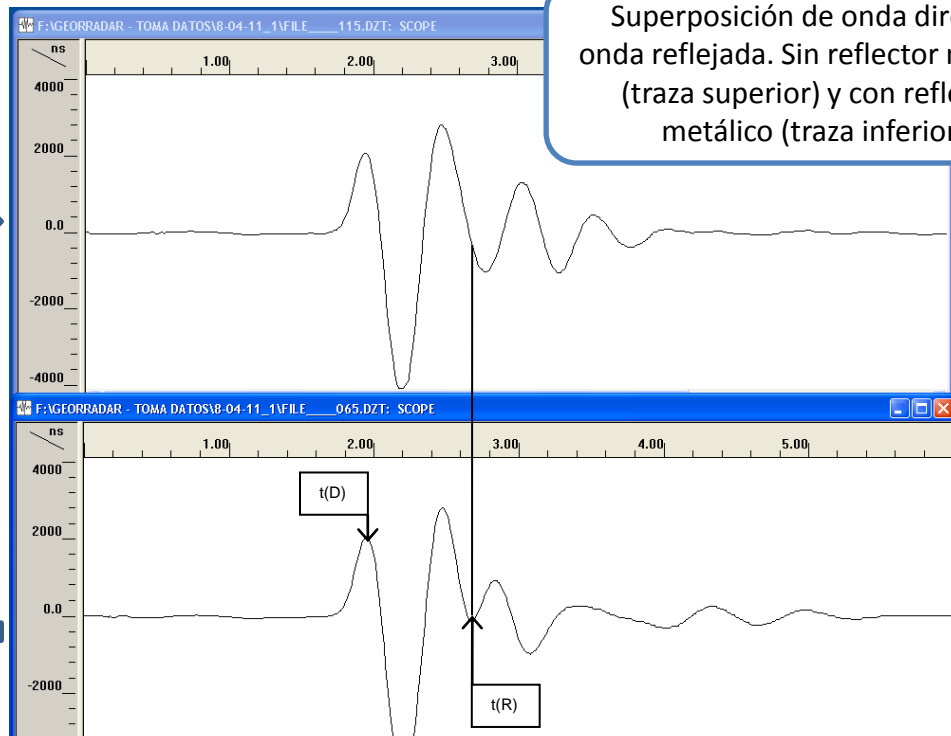
# Parámetros

## Amplitud de onda

- Se obtiene tanto la amplitud de la onda directa  $A_t(D)$  como la amplitud de la onda de la reflexión  $A_t(R)$ .

Para poder obtener las amplitudes, primero se deben sacar mediante el software Radan, los tiempos de la onda directa  $t(D)$  y de la onda de la reflexión  $t(R)$ .

Una vez conocidos estos tiempos, se obtiene la amplitud de la onda en estos puntos (sin aplicar valor de ganancia).



Superposición de onda directa y onda reflejada. Sin reflector metálico (traza superior) y con reflector metálico (traza inferior).

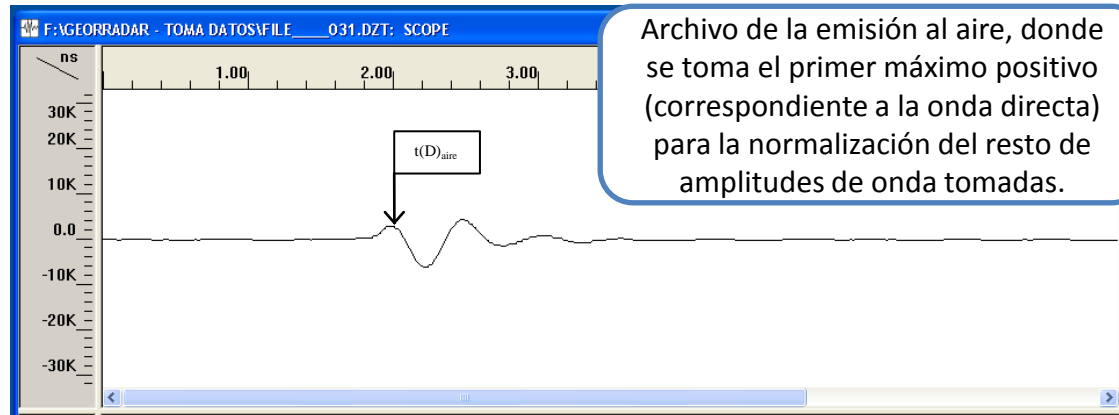
Eje X: tiempo medido en ns.

Eje Y: amplitud de onda, sin dimensiones ya que no se trata de valores absolutos.

# Parámetros

## Amplitud de onda

- La amplitud de onda debe normalizarse mediante una emisión al aire realizada previamente a la realización de los ensayos.



- Todas las amplitudes tomadas anteriormente en el procesado de los archivos deben normalizarse respecto a la amplitud de la onda directa tomada en la emisión al aire, expresándose el resto de amplitudes en %.

# Tablas datos

## TABLA TIPO DE OBTENCIÓN DE DATOS DE LA MADERA

CASO 1	MADERA HAYA								
PROBETA	t(D)	t(R)	A t(D)	A t(R)	A emisión aire	A t(D) Normalizada (%)	A t(R) Normalizada (%)	V1 (cm/ns)	$\epsilon_1$
1	1,94	2,98	1595	844	2776	57,46	30,40	15,38	3,80
2	1,95	3,01	1452	806	2776	52,31	29,03	15,09	3,95
3	1,96	3,04	1477	260	2776	53,21	9,37	14,81	4,10
4	1,96	2,97	1607	1004	2776	57,89	36,17	15,84	3,59
5	1,94	3,02	1511	1108	2776	54,43	39,91	14,81	4,10
6	1,95	3,02	1632	979	2776	58,79	35,27	14,95	4,03
7	1,95	3,01	1590	105	2776	57,28	3,78	15,09	3,95
8	1,96	3,04	1469	1259	2776	52,92	45,35	14,81	4,10
9	1,95	3,03	1521	1318	2776	54,79	47,48	14,81	4,10
10	1,96	3,02	1453	558	2776	52,34	20,10	15,09	3,95
11	1,96	3,03	1518	1084	2776	54,68	39,05	14,95	4,03
12	1,96	3,27	1594	-1350	2776	57,42	48,63	12,21	6,03
13	1,94	3,02	1511	1529	2776	54,43	55,08	14,81	4,10
14	1,96	3,02	1549	220	2776	55,80	7,93	15,09	3,95
15	1,95	3	1318	506	2776	47,48	18,23	15,24	3,88

# Tablas datos

## TABLA DATOS RESUMEN MADERA DE HAYA CASO 1 – CASO 2

CASO 1	MADERA HAYA			
	A t(D) Normalizada (%)	A t(R) Normalizada (%)	V1 (cm/ns)	$\epsilon_1$
Media	54,478	31,052	14,869	4,110
Varianza	7,988	238,982	0,575	0,283
Desviación típica	2,826	15,459	0,758	0,532

CASO 2	MADERA HAYA				
	A t(D) Normalizada (%)	A t(R) Normalizada (%)	V2 (cm/ns)	$\epsilon_2$	$\epsilon_1/\epsilon_2$
Media	64,438	40,687	19,194	2,453	1,686
Varianza	5,557	41,267	0,457	0,034	0,067
Desviación típica	2,357	6,424	0,676	0,184	0,259

## TABLA DATOS RESUMEN MADERA DE PINO RUSO CASO 1

CASO 1	MADERA PINO RUSO			
	A t(D) Normalizada (%)	A t(R) Normalizada (%)	V1 (cm/ns)	$\epsilon_1$
Media	70,807	11,826	20,622	2,117
Varianza	14,224	67,998	0,070	0,003
Desviación típica	3,771	8,246	0,265	0,055

CASO 2	MADERA PINO RUSO				
	A t(D) Normalizada (%)	A t(R) Normalizada (%)	V2 (cm/ns)	$\epsilon_2$	$\epsilon_1/\epsilon_2$
Media	84,353	27,514	22,652	1,756	1,207
Varianza	19,431	142,862	0,237	0,006	0,003
Desviación típica	4,408	11,952	0,487	0,077	0,055

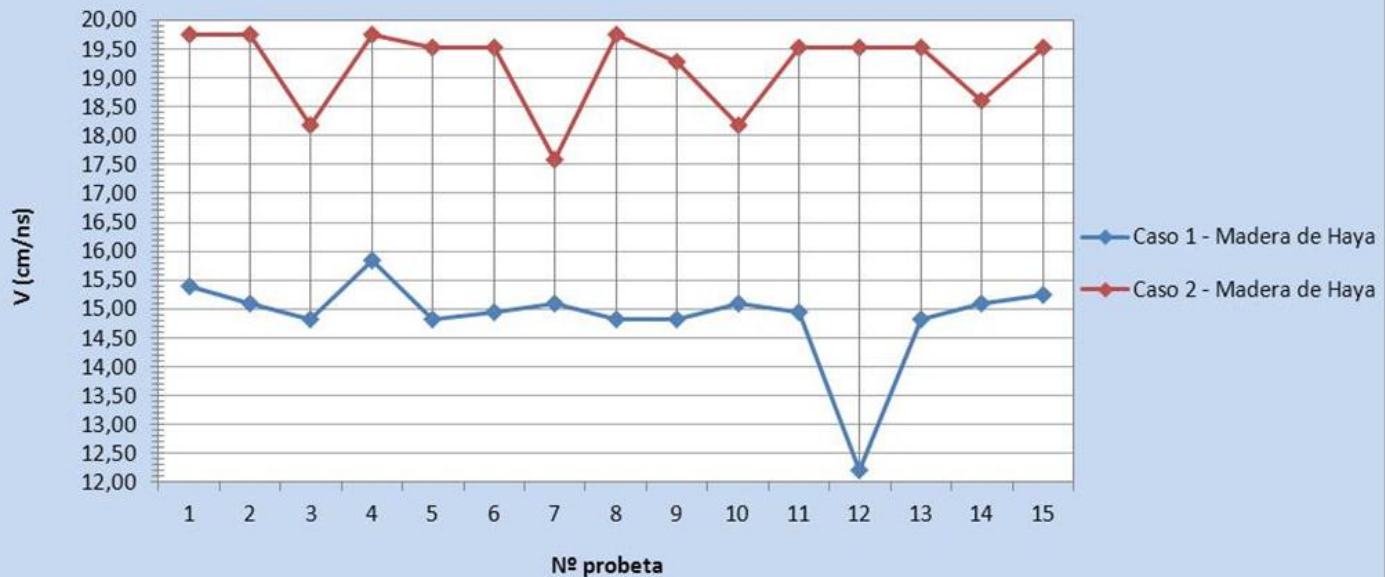


# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## Comparación velocidades de propagación

Vp //: valor medio = 14,87 cm/ns  
desviación típica = 0,758  
Vp I: valor medio = 19,19 cm/ns  
desviación típica = 0,676

Velocidades de propagación: Madera de Haya

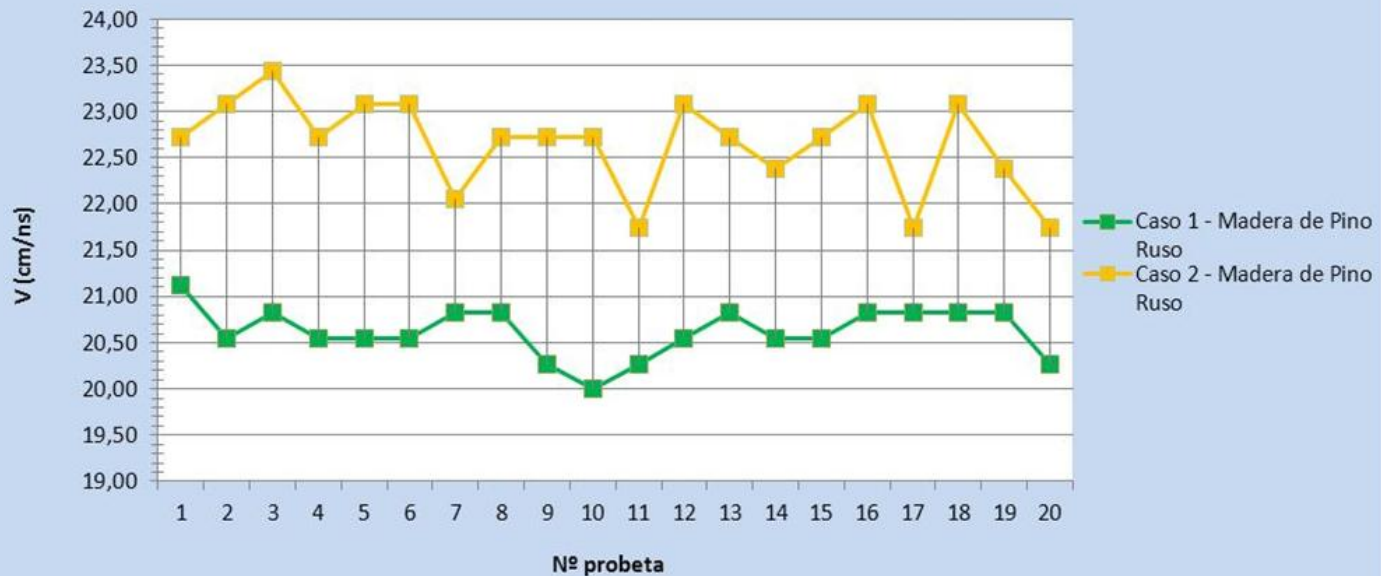


# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

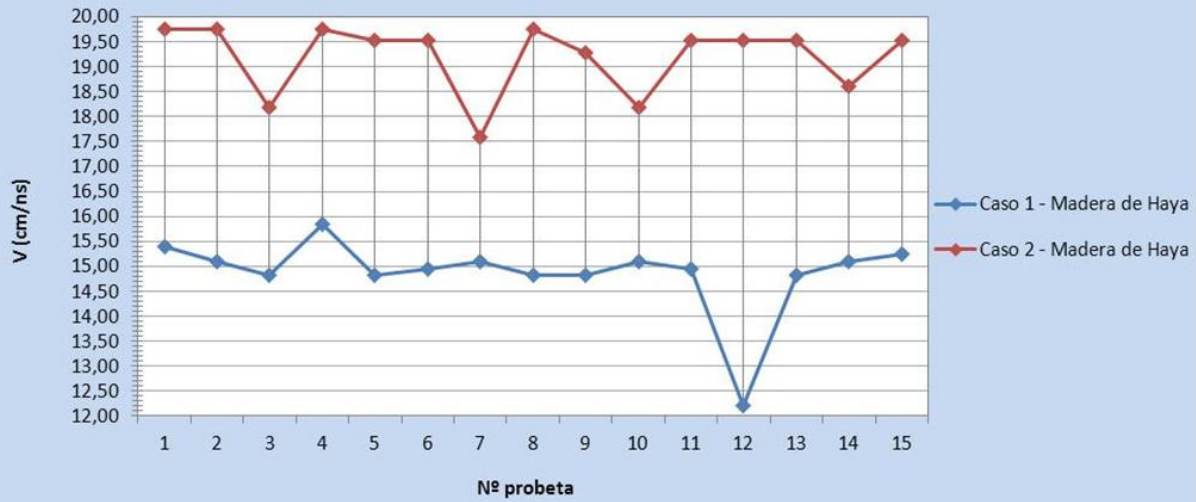
## Comparación velocidades de propagación

Vp //: valor medio = 20,62 cm/ns  
desviación típica = 0,265  
Vp I: valor medio = 22,85 cm/ns  
desviación típica = 0,486

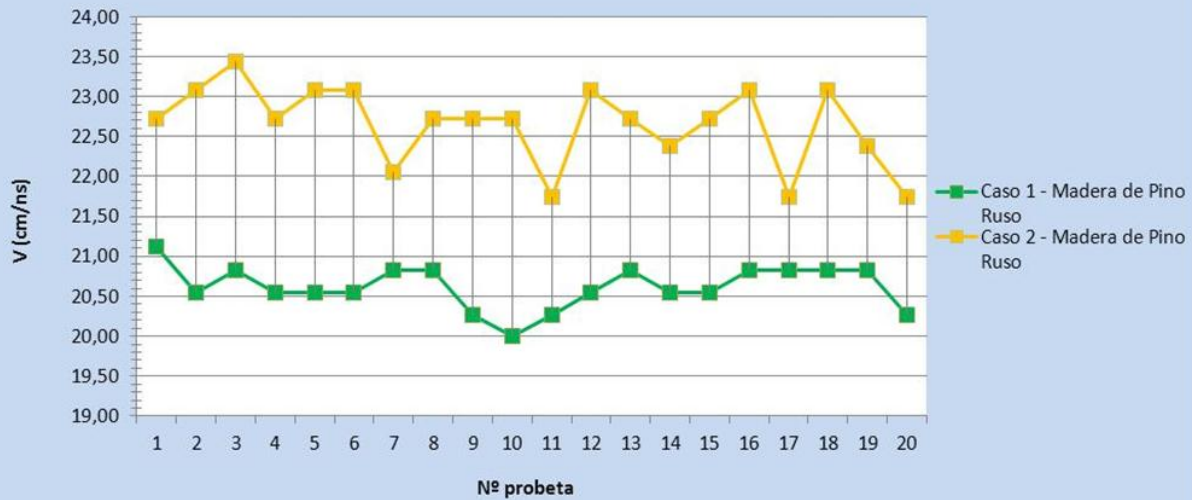
Velocidades de propagación: Madera de Pino Ruso



### Velocidades de propagación: Madera de Haya



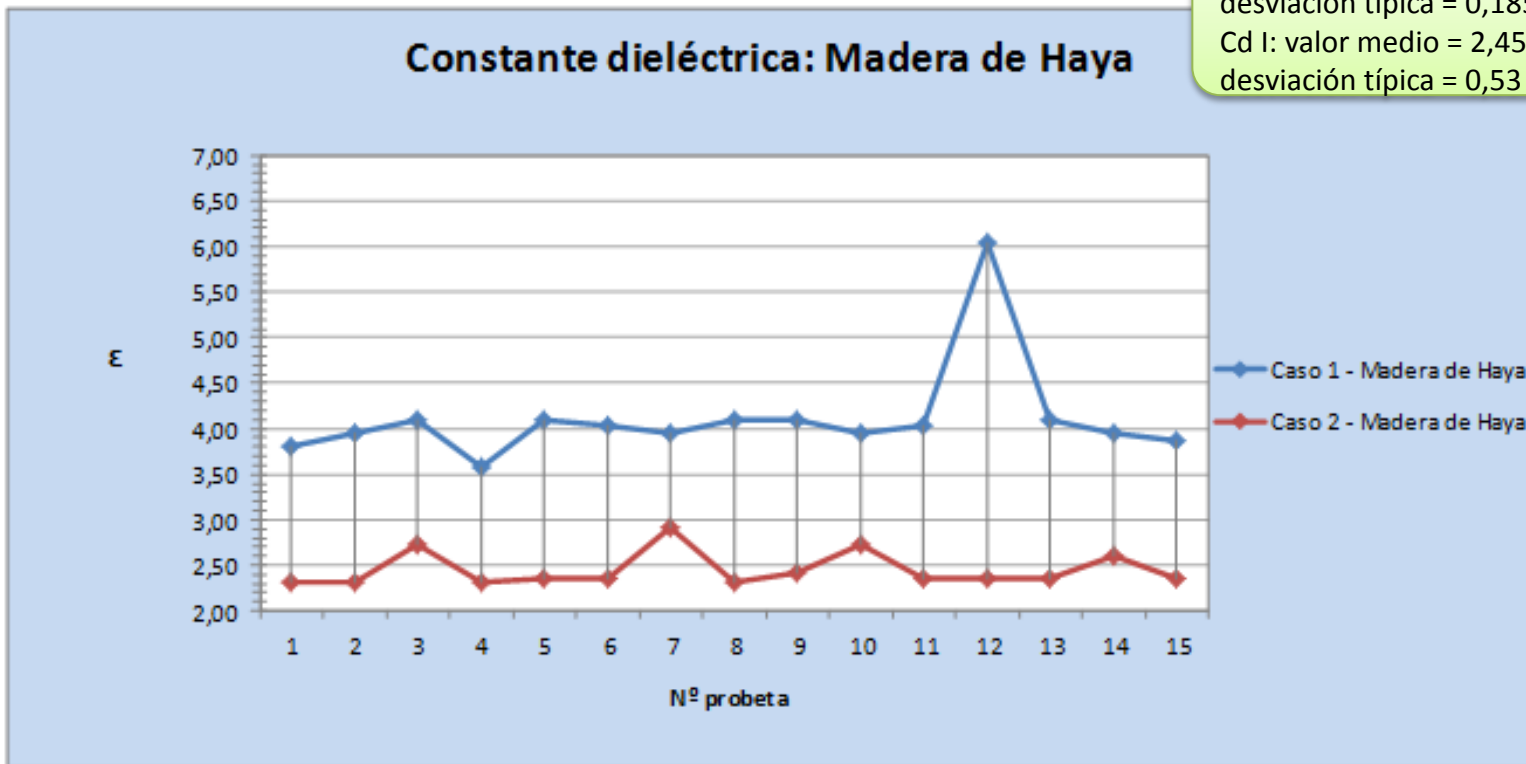
### Velocidades de propagación: Madera de Pino Ruso



# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## Comparación constante dieléctrica

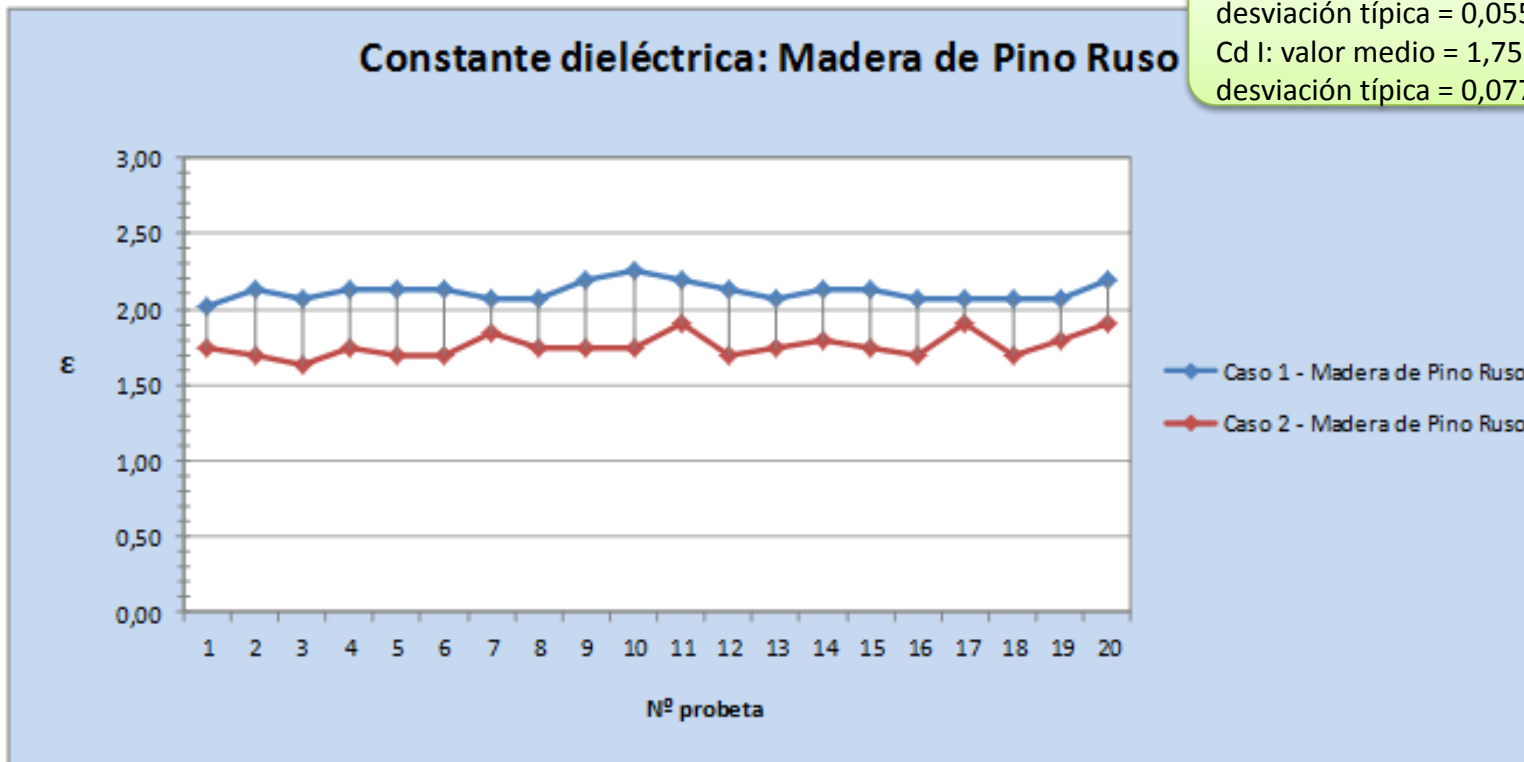
Cd //: valor medio = 4,11  
desviación típica = 0,185  
Cd I: valor medio = 2,45  
desviación típica = 0,53



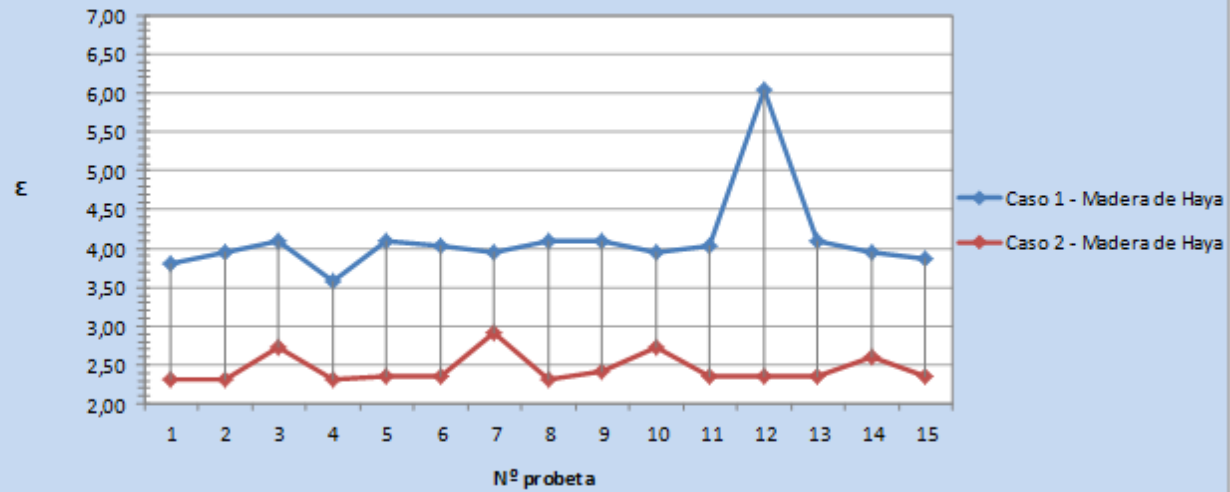
# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## Comparación constante dieléctrica

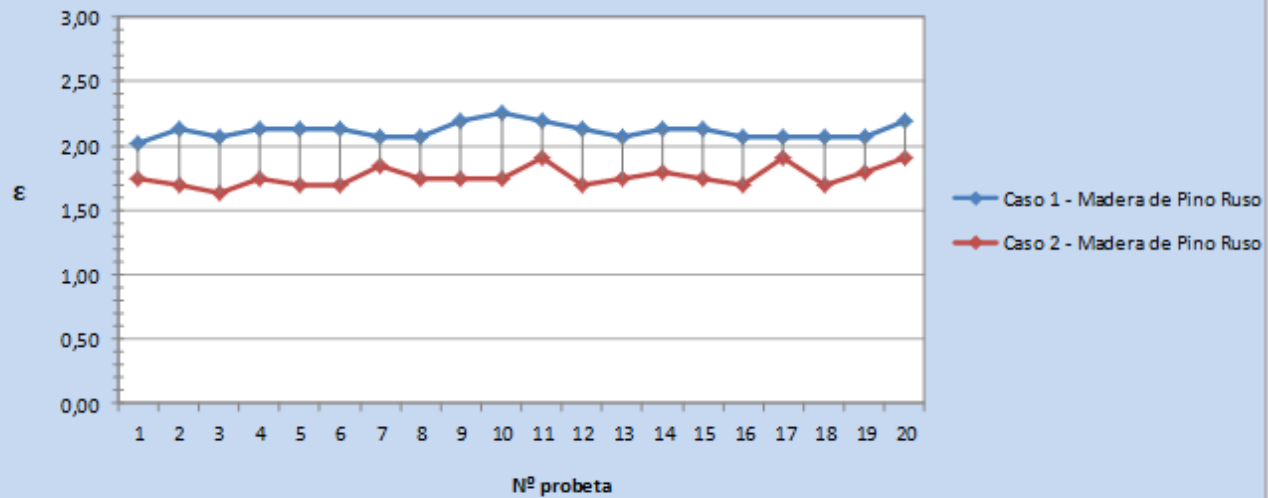
Cd //: valor medio = 2,11  
desviación típica = 0,055  
Cd I: valor medio = 1,75  
desviación típica = 0,077



### Constante dieléctrica: Madera de Haya

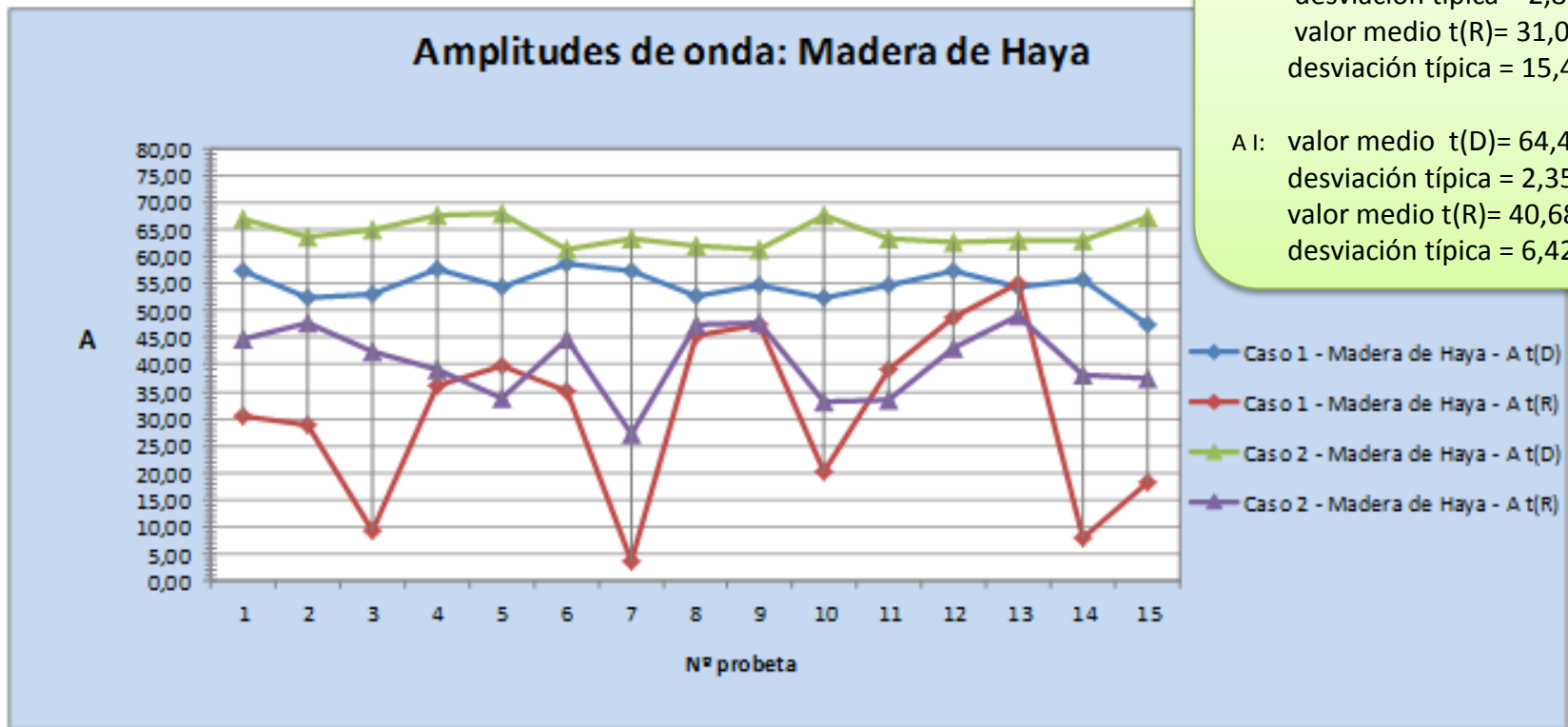


### Constante dieléctrica: Madera de Pino Ruso



# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## Comparación amplitud de onda



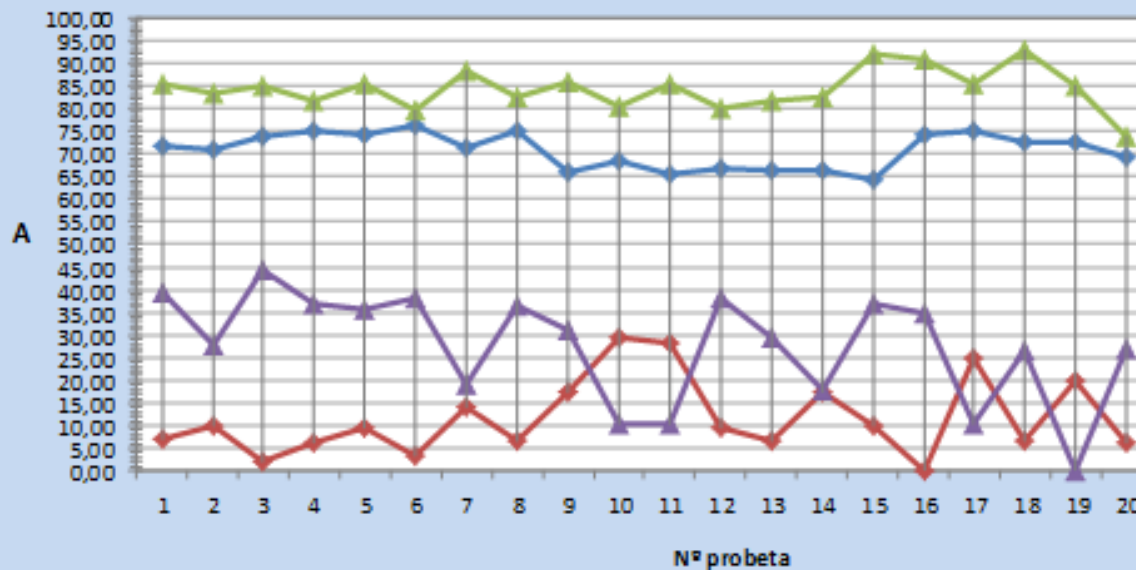
A //: valor medio  $t(D)=54,74\%$   
desviación típica = 2,81%  
valor medio  $t(R)= 31,05 \%$   
desviación típica = 15,46%

A I: valor medio  $t(D)= 64,43\%$   
desviación típica = 2,35%  
valor medio  $t(R)= 40,68 \%$   
desviación típica = 6,42%

# INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

## Comparación amplitud de onda

### Amplitudes de onda: Madera de Pino Ruso



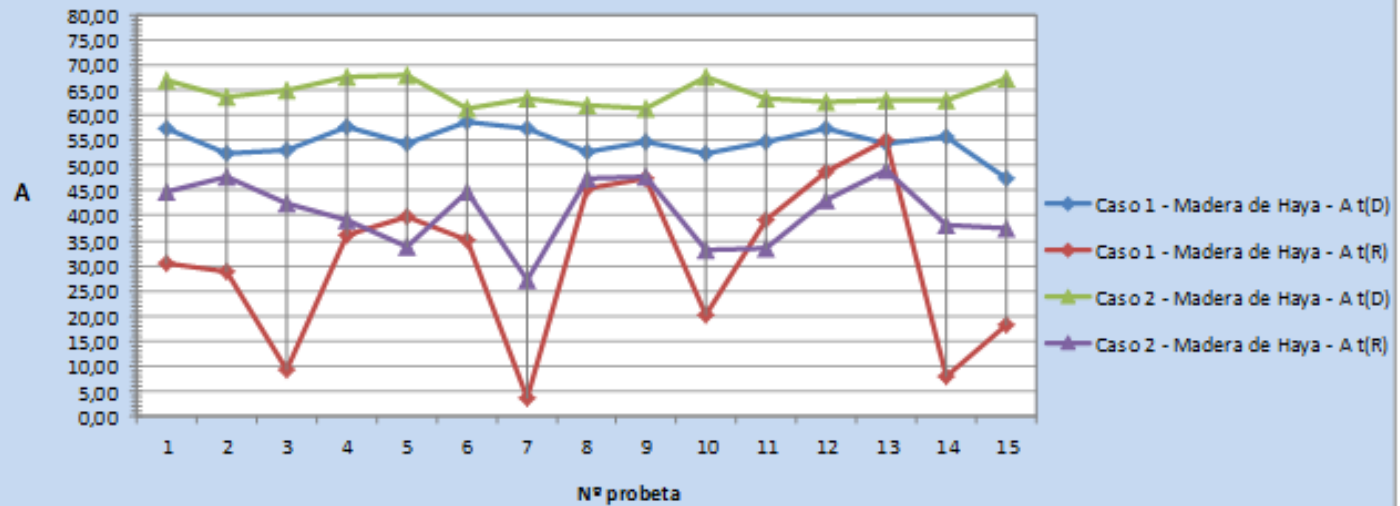
A //: valor medio  $t(D)=70,80\%$   
desviación típica = 3,77%  
valor medio  $t(R)= 11,82 \%$   
desviación típica = 8,24%

A I: valor medio  $t(D)= 84,35\%$   
desviación típica = 4,4%  
valor medio  $t(R)= 27,51 \%$   
desviación típica = 11,95%

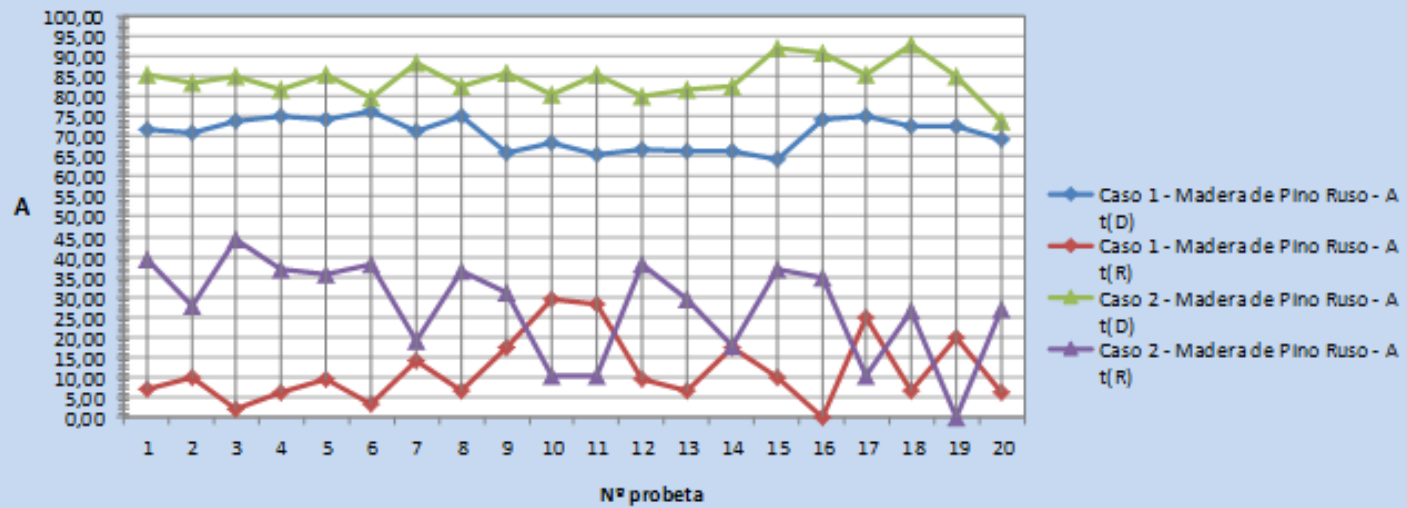
—◆— Caso 1 - Madera de Pino Ruso - A  
 $t(D)$   
—◆— Caso 1 - Madera de Pino Ruso - A  
 $t(R)$   
—▲— Caso 2 - Madera de Pino Ruso - A  
 $t(D)$   
—▲— Caso 2 - Madera de Pino Ruso - A  
 $t(R)$



## Amplitudes de onda: Madera de Haya



## Amplitudes de onda: Madera de Pino Ruso



# CONCLUSIONES

El Georradar empleado es de fácil manejo y la realización de los ensayos ha resultado ser sencilla.

El programa informático empleado (Radan) es una herramienta muy útil para el análisis de los archivos.

## Parámetros estudiados

**Velocidad de propagación:** es mayor cuando el campo eléctrico es perpendicular a las fibras de la madera.

### **Amplitud de onda:**

Directa: es más pequeña cuando el campo eléctrico es paralelo a las fibras que cuando es perpendicular.

Reflejada: es mayor cuando el campo eléctrico es perpendicular a las fibras que cuando es paralelo (75 % de los casos).

**Constante dieléctrica:** es mayor en dirección paralela a las fibras que en dirección perpendicular.

Relación de parámetros:

Cuanto menos polarizado esté el medio, menores son los valores de la amplitud de onda y de la constante dieléctrica.

Cuanto menor es la velocidad de propagación, mayor es la constante dieléctrica.

La anisotropía dieléctrica es mayor en la madera de Haya que en la madera de Pino Ruso.