TECNIACUSTICA León · 2010

SIMULACIÓN ACÚSTICA DE TEJIDOS VEGETALES EN COORDENADAS ESFÉRICAS MEDIANTE FDTD

Noé Jiménez, Rubén Picó, Francisco Camarena,
Javier Redondo, Bernardino Roig, Silvia Adrian



ÍNDICE

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

1. Introducción
   - Objetivos
   - Metodología
   - Morfología del fruto
2. Caracterización Ultrasónica de la Naranja
3. Determinación de las Características Elásticas
   - Hipótesis/Modelo
4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas
5. Resultados
6. Conclusiones

1. INTRODUCCIÓN

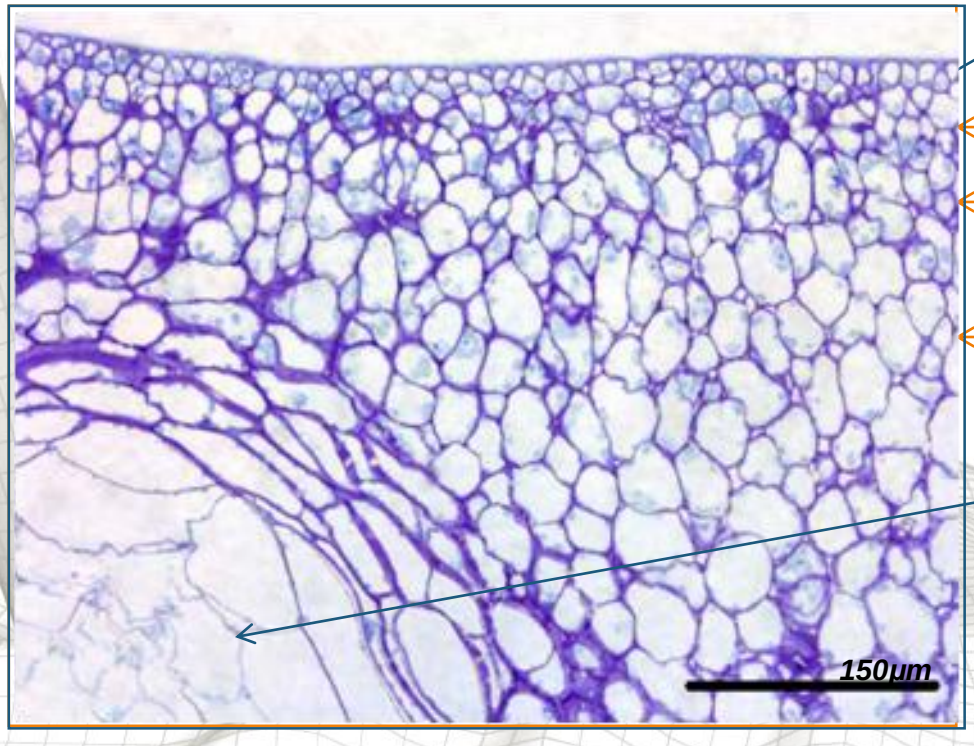
- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- OBJETIVOS:
  - Monitorizar el estado de productos hortofrutícolas en procesos postcosecha mediante un ensayo ultrasónico no destructivo.
  - Profundizar en los mecanismos físicos relativos a la propagación de ondas elásticas en tejidos biológicos
- METODOLOGÍA
  - Medidas experimentales
  - Simulación numérica FDTD (*Finite-difference time-domain method*)

1. INTRODUCCIÓN

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- MORFOLOGÍA DEL FRUTO

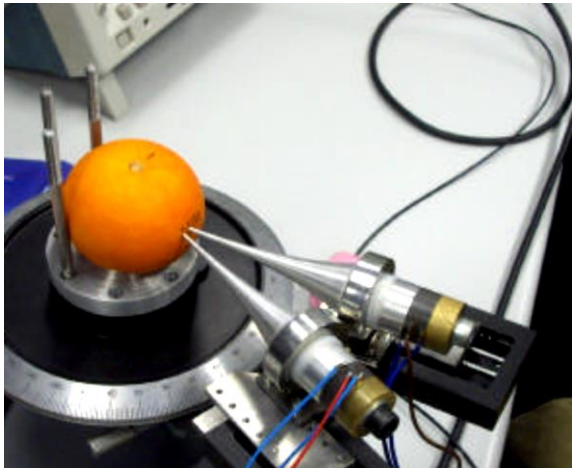


- Estructuras sólidas, líquidos, capas porosas y gases

2. Caracterización Ultrasónica de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Dispositivo Ultrasónico
  - Transductor tipo Sándwich, 40kHz
  - Focalizador mecánico
  - 2 transductores: Emisión/recepción



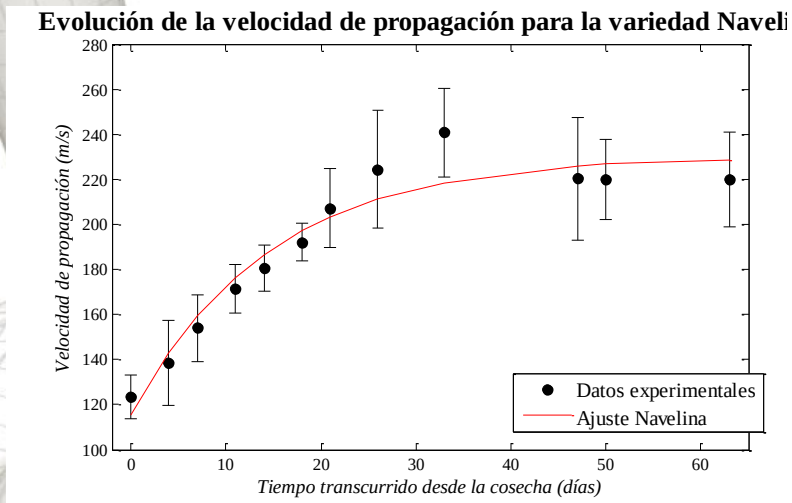
- Medida
  - Tiempo de vuelo
  - Amplitud a diferentes distancias
  - Variedades medidas: Navelina y Ortánica
  - A lo largo de 2 meses desde la cosecha
  - Paralelamente deshidratación

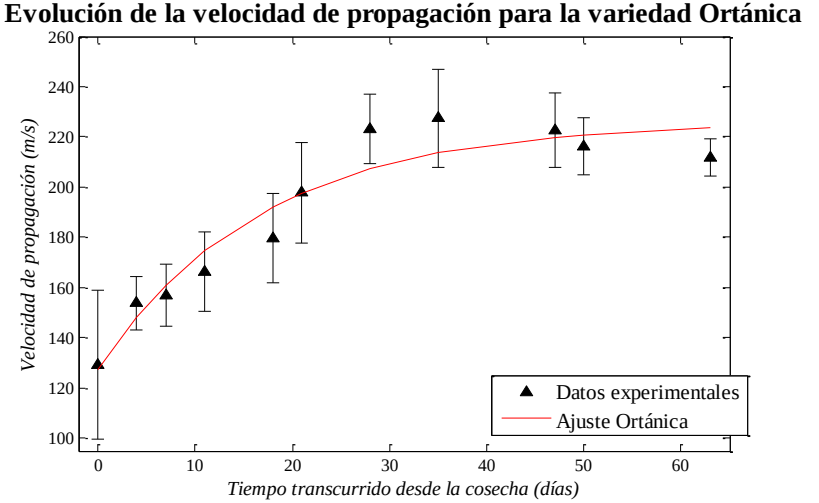
- Post-procesado
  - Velocidad de Propagación
  - Coeficiente de atenuación del tejido

2. Caracterización Ultrasónica de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

1. Bajas velocidades de propagación
2. Altas absorciones acústicas (1dB/mm to 3dB/mm)





$$c_{Navel} = 115,(170^{0},0^{6}8^{t}) + 115,$$

$$c_{Ortanique} = 98,5(186^{0}) + 127,1$$

2. Caracterización Ultrasónica de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

1. Bajas velocidades de propagación
2. Altas absorciones acústicas (1dB/mm to 3dB/mm)

Medio	Velocidad de propagación (medida) (m/s)	Atenuación (medida) (dB/mm)
Naranja	130-240	2,1-3,8 (40 kHz)
Aguacate*	150-400	2,5-5,0 (50kHz)
Manzana*	98-183	1,2-1,5 (1-5 MHz)
Melón*	61-90	2,6-7,1 (50 kHz)
Patata*	686,89	0,6791 (100 kHz)
Zanahoria*	341-500	1,02:1,23 (37-50 kHz)

** Ultrasonic measured acoustics parameters (Mizrach, 2008)*

3. Determinación de las Características Elásticas de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Obtener características elásticas
- ¿Tipo de onda medida?

Medio	[Medida] Velocidad de propagación (m/s)	[Medida] Densidad ρ (kg/m^3)	[Bibl.] Módulo de Young E (MPa)	[Bibl.] Coeficiente de Poisson V	[Calculada] Velocidad de propagación longitudinal (m/s)	[Calculada] Velocidad de propagación Transversal (m/s)
Naranja	130-240	903	1,57*	0,34*	82,7	54,6
Aguacate	150-400	963	0,48*	0,33*	32,1	18,2
Manzana	98-183	1003	3,33*	0,17*	65,1	36,5
Melón	61-90	1209	5,54*	0,30*	76,4	49,6
Patata	686,89	1087	7,14*	0,25*	60,8	34,1
Zanahoria	341-500	1021	6,96*	0,30*	104,1	64,1

** Elastic parameters measured with stress-strain techniques (Singh, 2006), (Baryeh, 2000)(Grotte, 2002)(Jindal, 1985)(Bunyaphlann, 1973). Ultrasonic measured acoustics parameters (Mizrach, 2008)*

$$c_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \qquad c_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

3. Determinación de las Características Elásticas de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Obtener características elásticas
- ¿Tipo de onda medida?

- Los tejidos vegetales presentan características viscoelásticas:
  - La elasticidad depende de la frecuencia
  - Parámetros elásticos ensayos esfuerzo-deformación NO válidos a frecuencias ultrasónicas

3. Determinación de las Características Elásticas de la Naranja

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- HIPÓTESIS:
  1. **La corteza de la naranja es un tejido acuoso**, (tejido blando)
     - Existe una onda longitudinal similar a la de agua
       - (c_L=*1500 m/s*)
     - El coeficiente de Poisson es cercano a 0,5
       - (c_R=*0,95*c_S)
  2. **Las ondas medidas son superficiales tipo Rayleigh**
     - Medimos en la superficie, divergencia, shear window
     - La alta absorción de la capa porosa inhibe la creación de otros tipos de ondas superficiales (Lamb, etc.)

$$\mu = \rho\left(\frac{1}{0.95}c_{R,measured}\right)^2$$

$$\lambda + 2\mu = \rho c_{p,water}^2$$

Media	Measured density ρ (kg/m^3)	Young Modulus E (MPa)	Poisson coefficient v	Longitudinal propagation speed (m/s)	Measured Propagation speed (m/s)	Calculated Rayleigh surface wave
Orange	903	107,7	0,491	1540	130-240	200

4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas

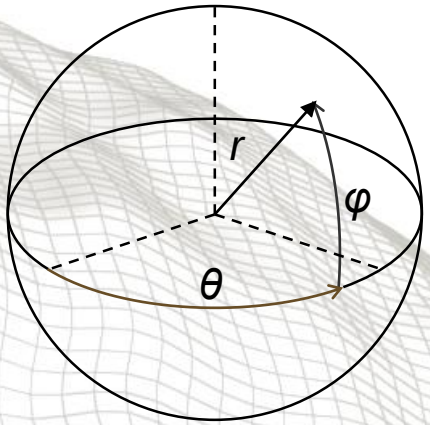
- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Modelo Físico: Solidos Elásticos Lineales
  - *(formulación esfuerzo-velocidad)*

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} = \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \qquad \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial t} = \lambda \bar{\mathbf{I}} (\nabla \cdot \boldsymbol{v}) + \mu (\nabla \boldsymbol{v} + \boldsymbol{v} \nabla)$$

    - $\boldsymbol{\tau}$ *tensor de esfuerzos,* $\boldsymbol{v}$ *vector velocidad,* λ *y* μ *parámetros de Lame', * ρ *densidad*

- Coordenadas esféricas + pérdidas
  - Sistema de 9 ecuaciones
  - 9 incógnitas:
    - 3 velocidad
    - 3 esfuerzo normal
    - 3 esfuerzo tangencial



4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Coordenadas esféricas + pérdidas

Velocidad de partícula

$$\rho\frac{\partial v_r}{\partial t}=\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial \phi}+\frac{2\tau_{rr}-\tau_{\theta\theta}-\tau_{\phi\phi}+\tau_{r\theta}\cot\theta}{r}$$

$$\rho\frac{\partial v_\theta}{\partial t}=\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r}+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial \tau_{\theta\phi}}{\partial \phi}+\frac{3\tau_{r\theta}+(\tau_{\theta\theta}-\tau_{\phi\phi})\cot\theta}{r}$$

$$\rho\frac{\partial v_\phi}{\partial t}=\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial \tau_{\phi\phi}}{\partial \phi}+\frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta\phi}}{\partial \theta}+\frac{3\tau_{r\phi}+2\tau_{\theta\phi}\cot\theta}{r}$$

Esfuerzo normal

$$\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial t}+\eta_P\tau_{rr}=\lambda\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{2}{r}v_r+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\cot\theta}{r}v_\theta+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}\right)+2\mu\frac{\partial v_r}{\partial r}$$

$$\frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial t}+\eta_P\tau_{\theta\theta}=\lambda\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{2}{r}v_r+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\cot\theta}{r}v_\theta+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}\right)+2\mu\left(\frac{v_r}{r}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}\right)$$

$$\frac{\partial \tau_{\phi\phi}}{\partial t}+\eta_P\tau_{\phi\phi}=\lambda\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{2}{r}v_r+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\cot\theta}{r}v_\theta+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}\right)+2\mu\left(\frac{v_r}{r}+\frac{\cot\theta}{r}v_\theta+\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_\phi}{\partial \phi}\right)$$

Esfuerzo tangencial

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial t}+\eta_S\tau_{r\theta}=\mu\left(\frac{1}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}-\frac{v_\theta}{r}+\frac{\partial v_\theta}{\partial r}\right)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\phi}}{\partial t}+\eta_S\tau_{r\phi}=\mu\left(\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_r}{\partial \phi}-\frac{v_\phi}{r}+\frac{\partial v_\phi}{\partial r}\right)$$

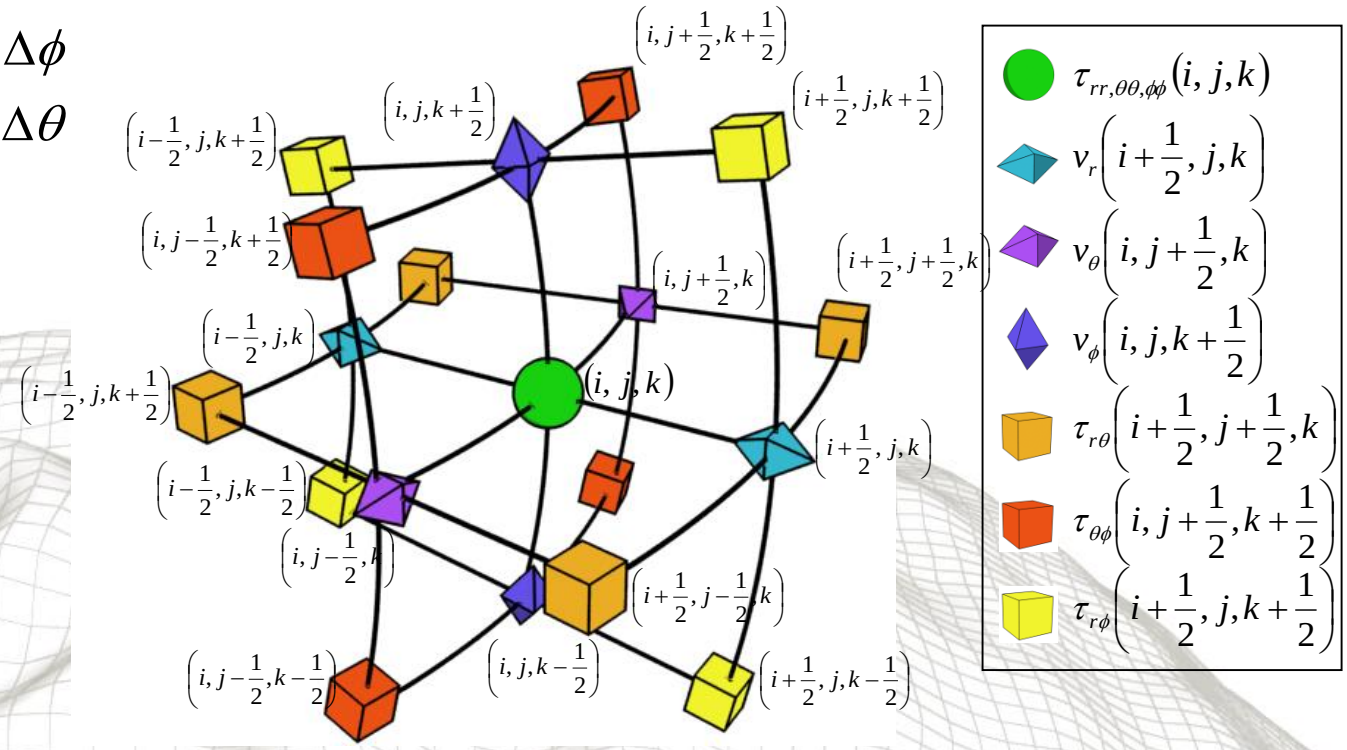
$$\frac{\partial \tau_{\theta\phi}}{\partial t}+\eta_S\tau_{\theta\phi}=\mu\left(\frac{1}{r\,\mathrm{sen}\,\theta}\frac{\partial v_\theta}{\partial \phi}+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\phi}{\partial \theta}-\frac{\cot\theta}{r}v_\phi\right)$$

4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Discretización al tresbolillo (Espacial y Temporal)

$$r = i \cdot \Delta r$$
$$\phi = k \cdot \Delta \phi$$
$$\theta = j \cdot \Delta \theta$$



4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Estabilidad:
  - *CFL:*

$$S = \frac{c_{\max}\Delta t}{\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta r \Delta\theta_{\min}\sin\phi_{\min})^2 + (\Delta r \Delta\phi_{\min})^2}} \leq 1$$

  - *Interfase entre medios:*

$$\rho_{avg} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \qquad \frac{1}{\lambda_{avg}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}\right) \qquad \frac{1}{\mu_{avg}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2}\right)$$

- Control de la dispersión:

$$N_\lambda \equiv \frac{c_{\min}}{f_{\max}\sqrt{(\Delta r)^2 + (\Delta r \Delta\theta_{\max}\sin\phi_{\max})^2 + (\Delta r \Delta\phi_{\max})^2}} \geq 10$$

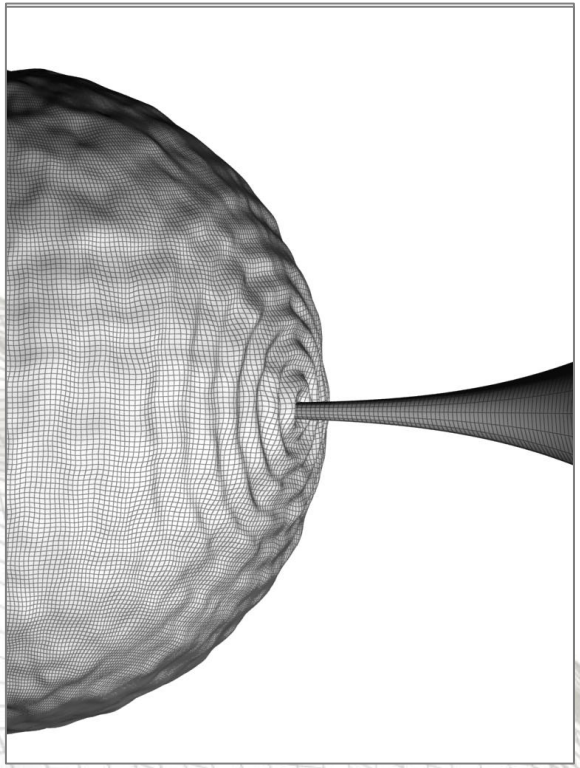
4. Simulación FDTD del Tejido Vegetal en Coordenadas Esféricas

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

- Condiciones de contorno absorbentes
  - *Perfect matched layers*, (PML)
  - *Complex coordinate stretching*
  - Atenuación radial, azimut y elevación

- División en subcomponentes:
  - De 9 a 30 ecuaciones.
  - Más incógnitas pero más pequeñas
  - Menos memoria: 30 a 2,8 GB
  - Menos tiempo procesado.

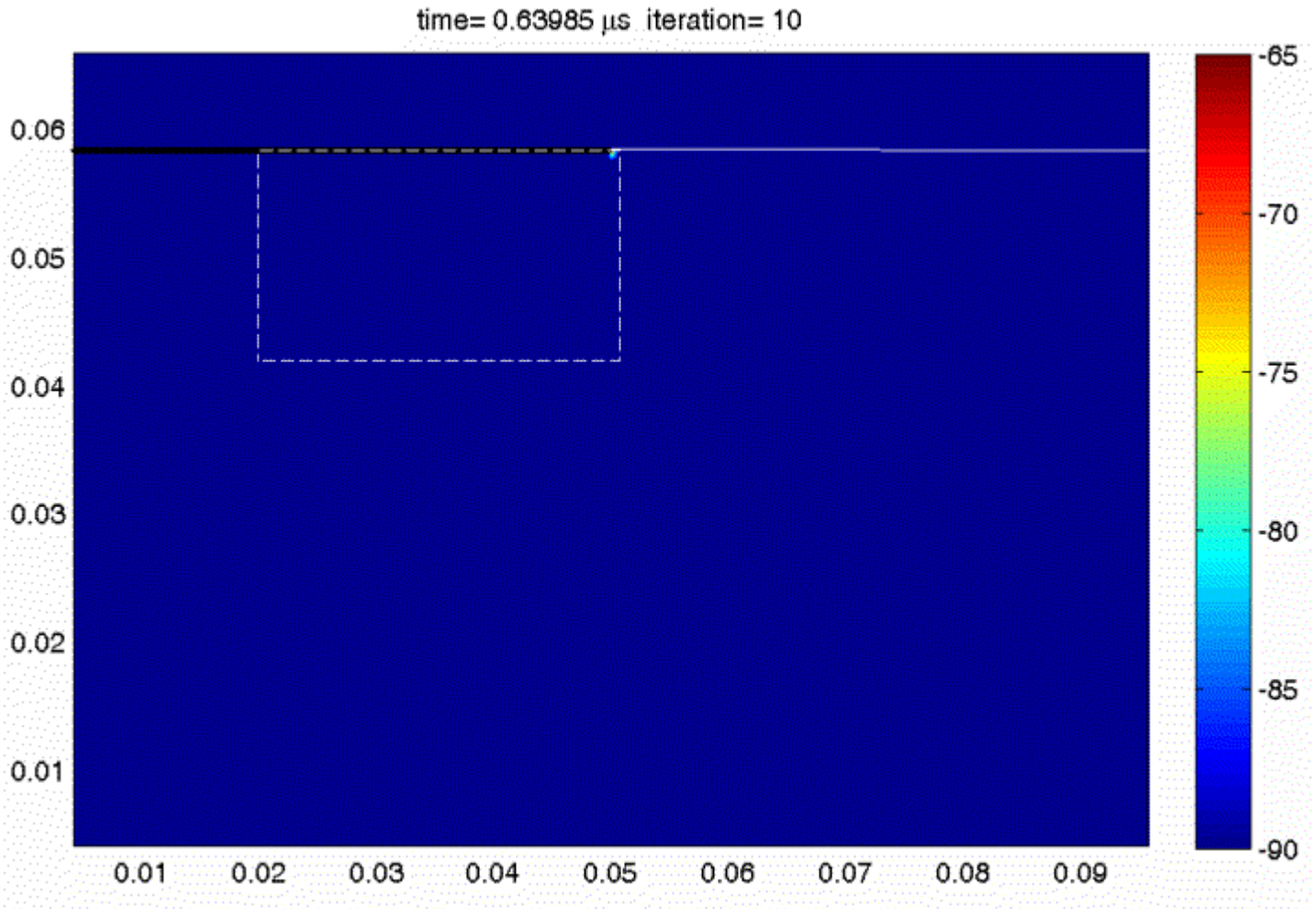
- Se evitan las singularidades
  - $r \neq 0$
  - $\theta \neq 0$



5. Resultados

- Introducción
- Caracterización experimental
- Parámetros Elásticos
- Simulación FDTD
- Resultados
- Conclusiones

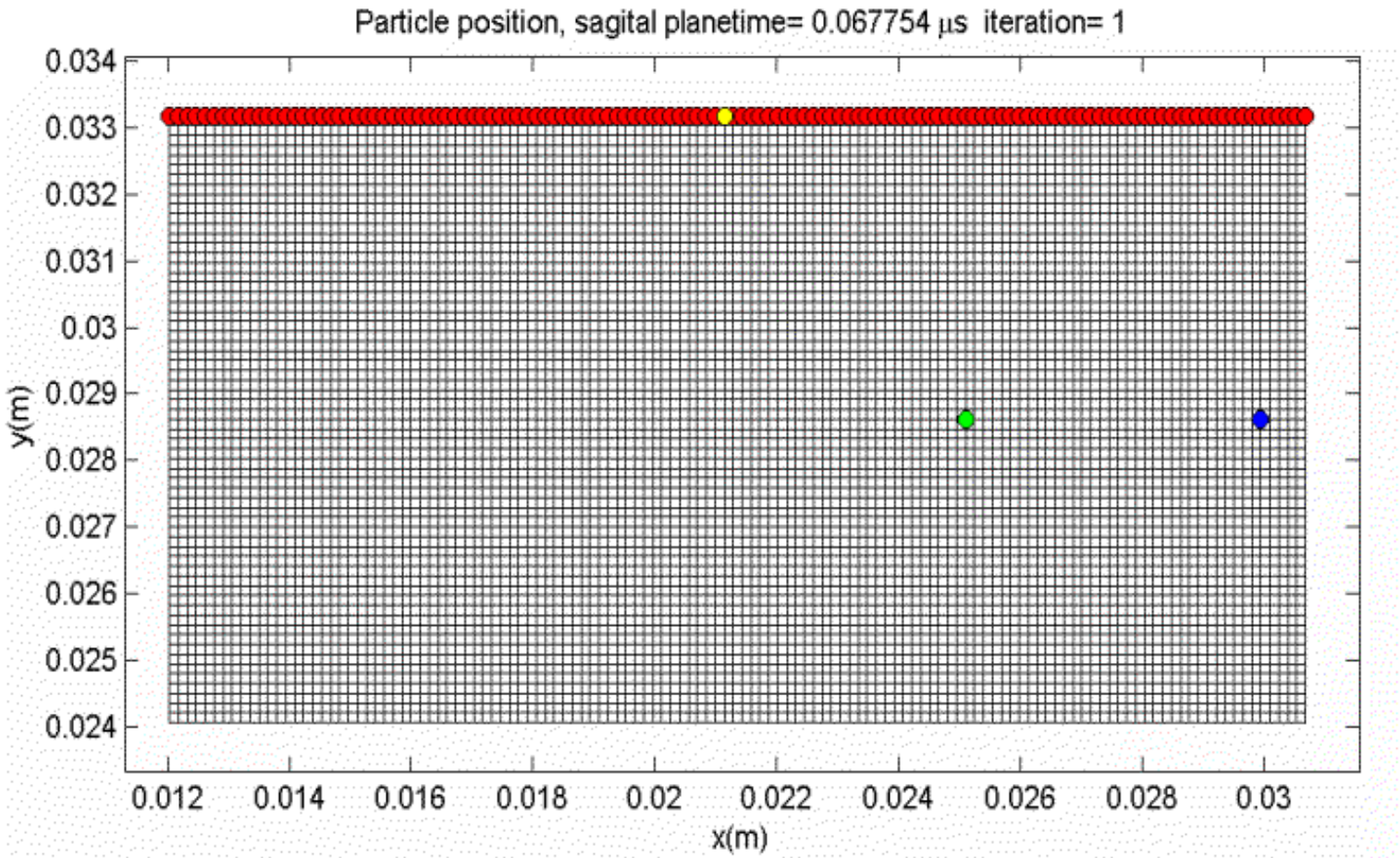
- Simulación sin capas ni absorción



5. RESULTADOS

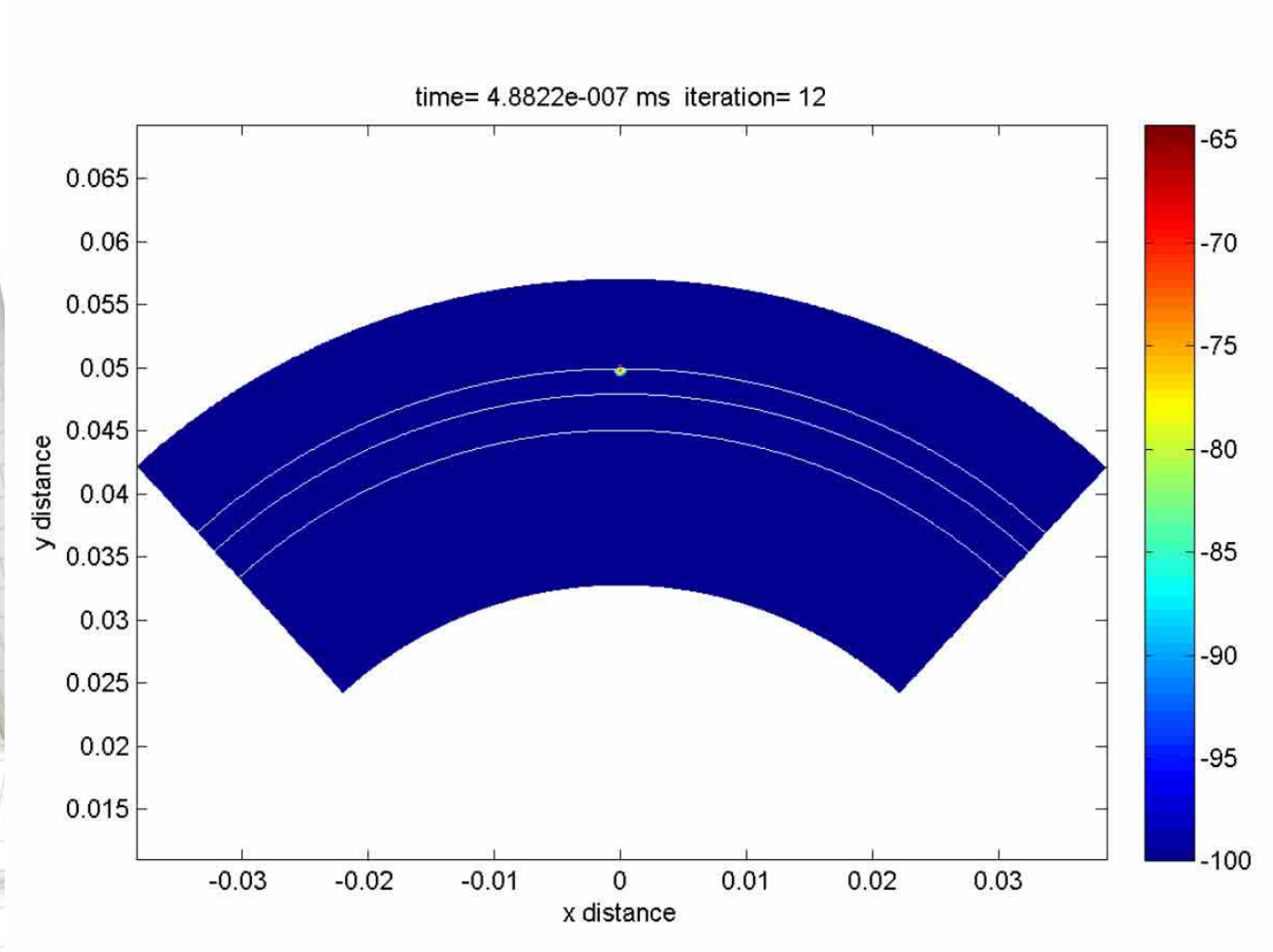
- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- SIMULACIÓN SIN CAPAS NI ABSORCIÓN



5. RESULTADOS

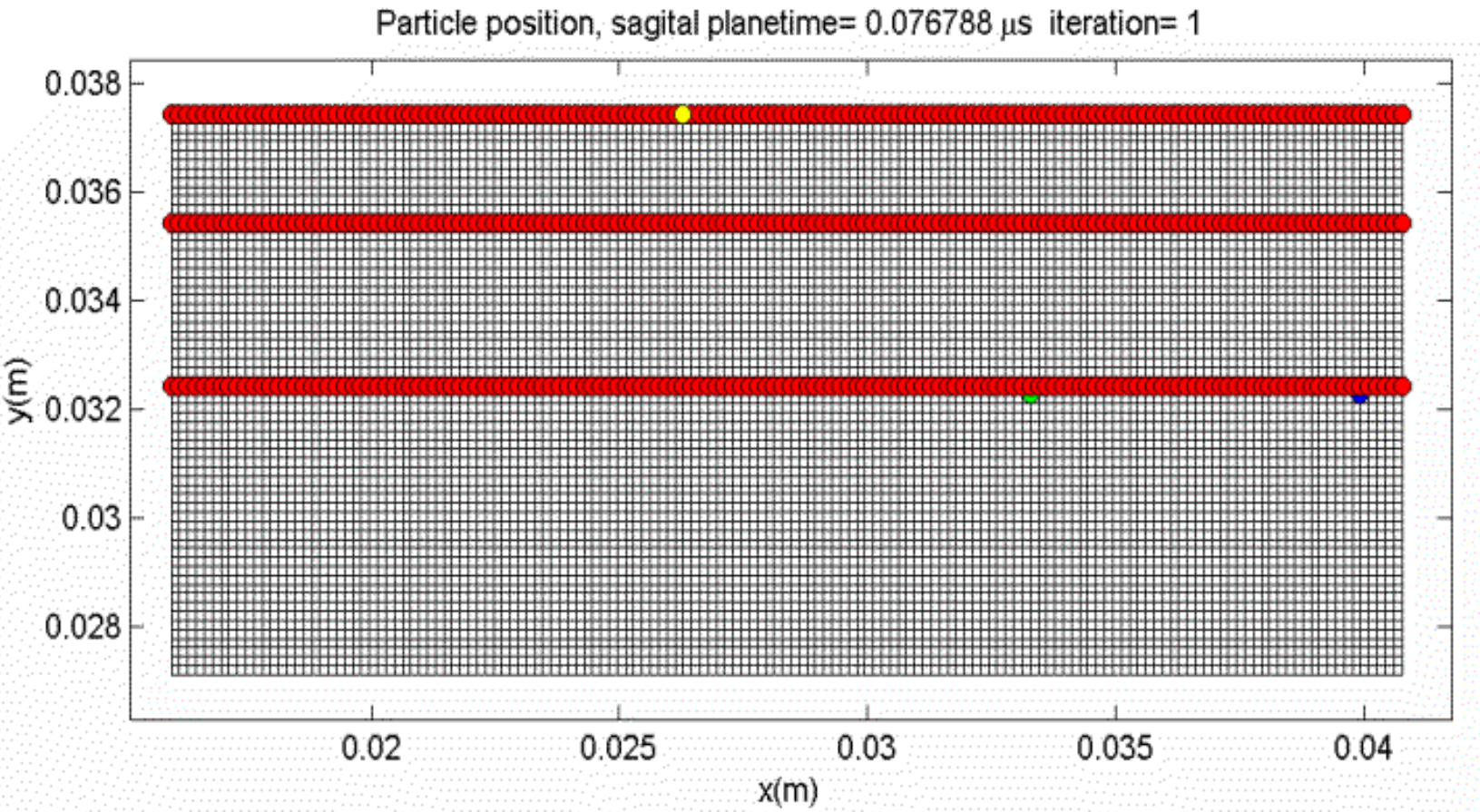
- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES



5. RESULTADOS

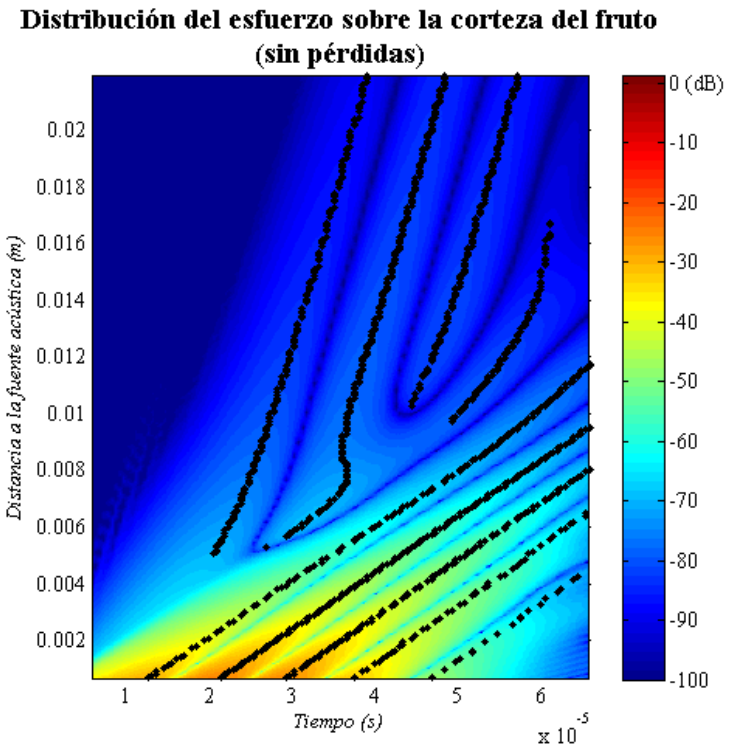
- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

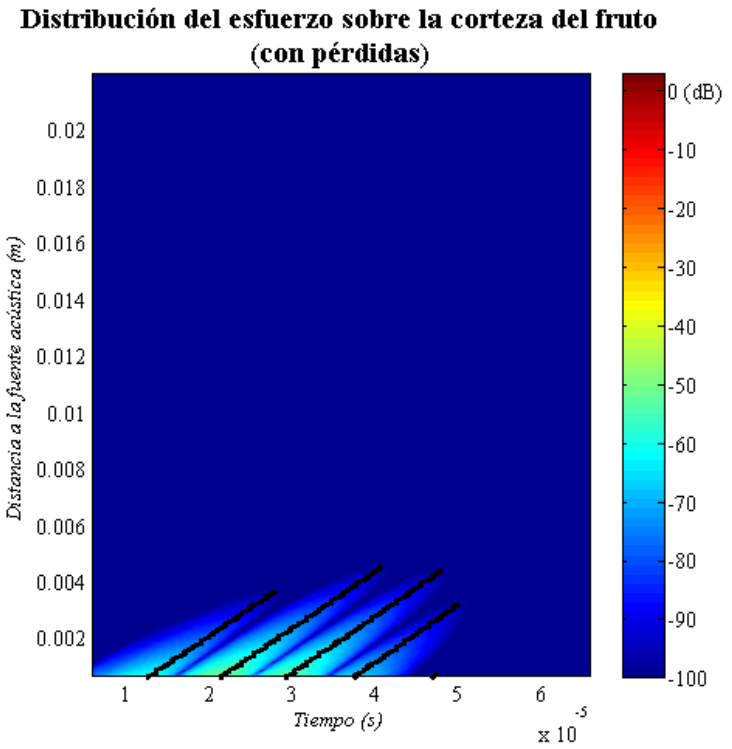
- ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS



5. RESULTADOS

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES



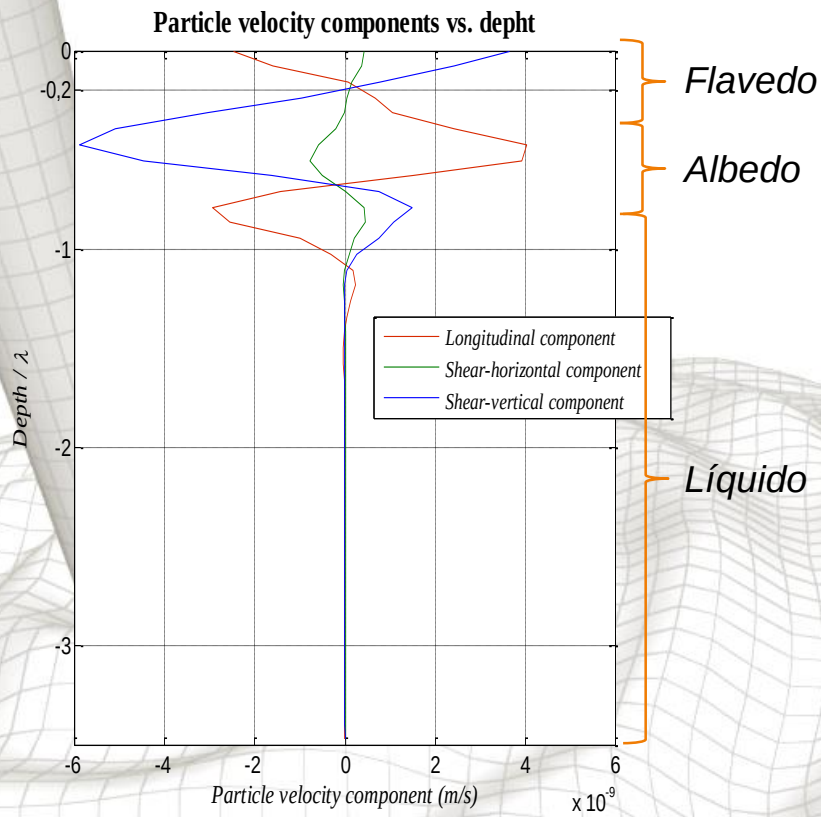


- c_L = 1576 m/s (intervalo de confianza del 95%)
- c_R = 200.2 m/s sin absorción
- c_R = 196.3 m/s pérdidas viscosas 3dB/mm

5. RESULTADOS

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DE LAS PARTÍCULAS



1. No penetra a profundidad>λ
2. Se invierte el movimiento por debajo de 0,2 λ
3. En reposos a 0,2 λ

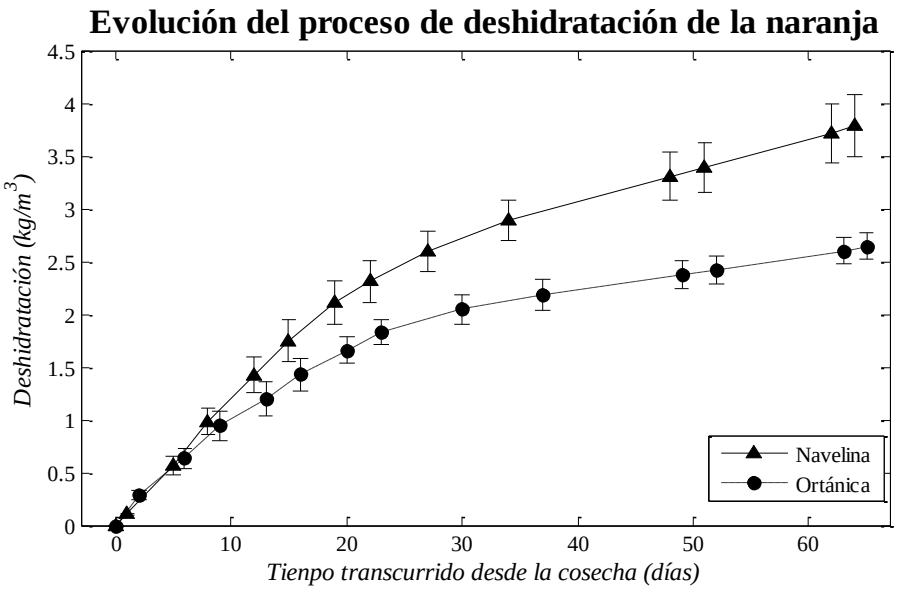
ONDAS DE RAYLEIGH

Las hipótesis se cumplen

5. RESULTADOS

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

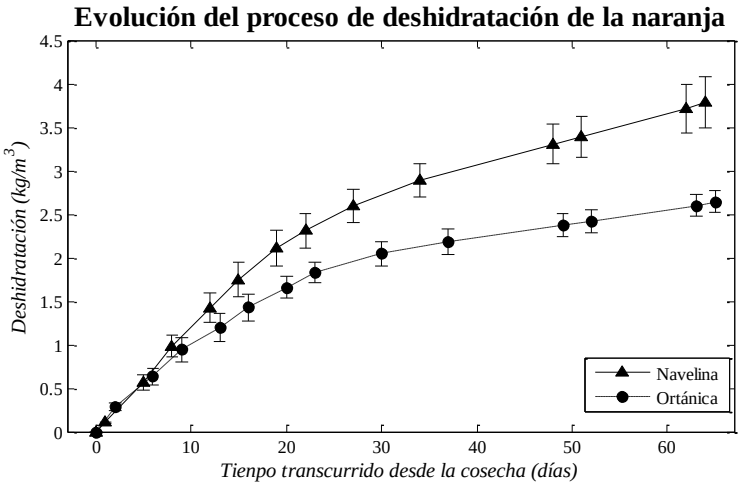
- MONITORIZAR LA MADUREZ:
  - Medir un índice fisiológico absoluto



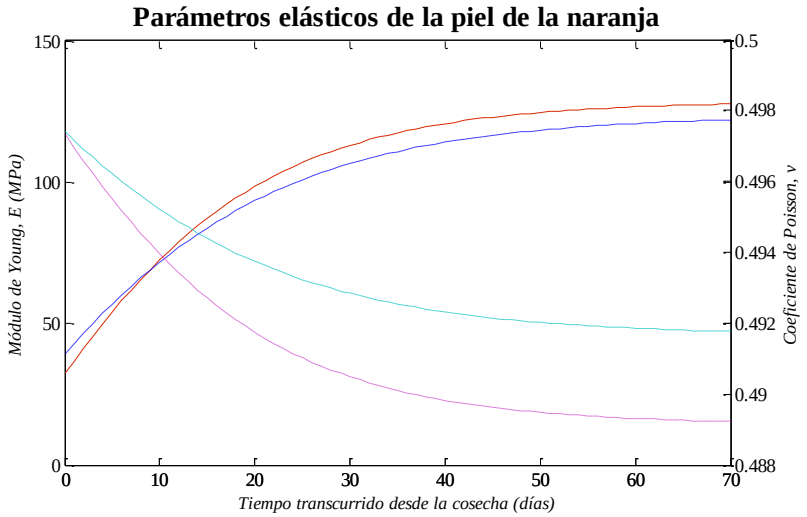
5. RESULTADOS

- MONITORIZACIÓN DE LA MADUREZ:

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES



- Medir un índice fisiológico absoluto (Deshidratación)



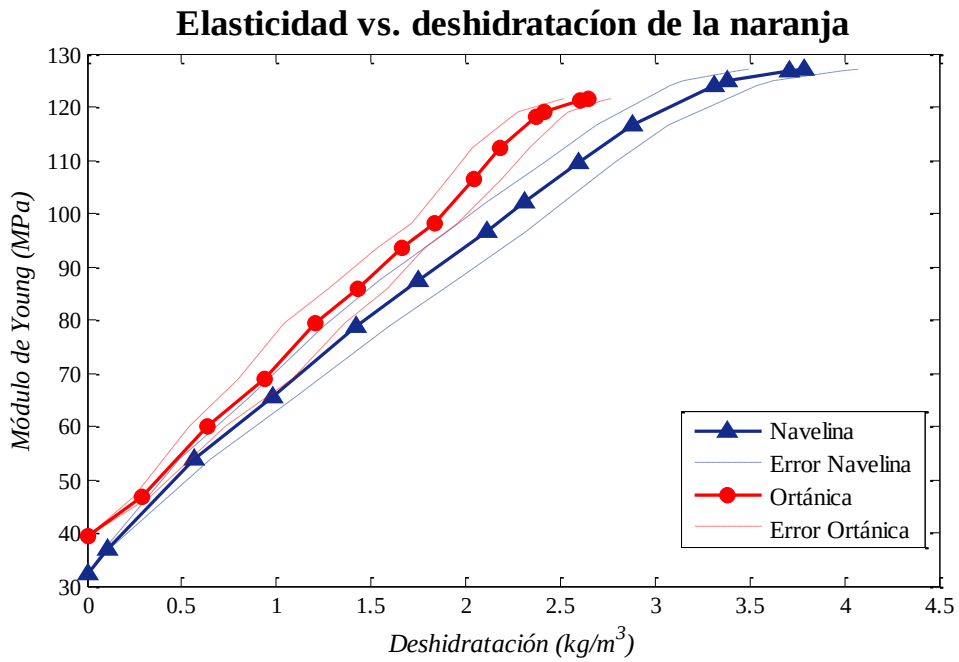
- A partir de la velocidad de Rayleigh (experimental) deducir los parámetros elásticos

Navel Young modulus
Navel Poisson's ratio
Ortanique Young modulus
Ortanique Poisson's ratio

5. RESULTADOS

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- MONITORIZACIÓN DE LA MADUREZ:
  - El módulo de Young está íntimamente ligado al contenido de agua del fruto.
  - módulo de Young ↔ índices de calidad psico-mecánicos como (turgencia, firmeza, rigidez)



6. CONCLUSIONES

- INTRODUCCIÓN
- CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL
- PARÁMETROS ELÁSTICOS
- SIMULACIÓN FDTD
- RESULTADOS
- CONCLUSIONES

- SE PROPONE UN MÉTODO ULTRASÓNICO NO DESTRUCTIVO PARA LA MONITORIZACIÓN DEL ESTADO DEL FRUTO
  - Velocidad de propagación de ondas de Rayleigh
  - Parámetros elásticos en función de variedad, tiempo, etc…
- SIMULACIÓN FDTD EN COORDENADAS ESFÉRICAS:
  - Compresión de los fenómenos acústicos en tejidos vegetales
  - Validación del modelo propuesto
- LÍNEAS FUTURAS
  - Incorporar viscoelasticidad y no linealidades
  - Otras aplicaciones:
    - Diagnóstico médico: Elastografía, monitorizar tratamientos HIFU

TECNIACUSTICA León · 2010

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA VALENCIA

IGIC Instituto de investigación para la gestión integrada de zonas costeras

MUCHAS GRACIAS

PREGUNTAS…

