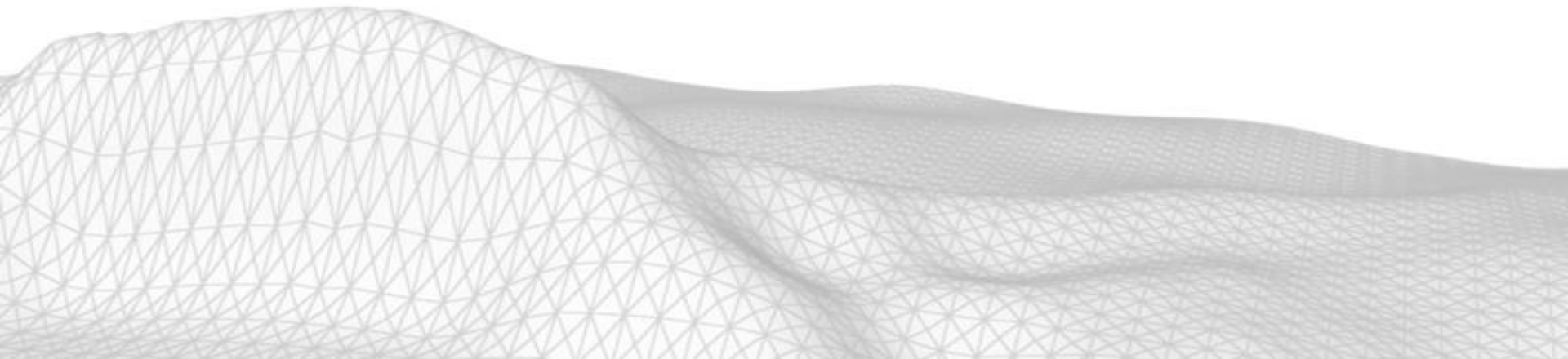
IGIC
Institut d'investigació per a la gestió integrada de zones costaneres

TECNIACUSTICA Cáceres · 2011

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

PREDICCIÓN NUMÉRICA DE ONDAS ACÚSTICAS DE AMPLITUD FINITA BAJO CONDICIONES DE CONTORNO ARBITRARIAS

Noé Jiménez, Javier Redondo, Bernardino Roig, Rubén Picó,
Víctor Sánchez-Morcillo, Francisco Camarena



ÍNDICE

- Introducción
  - *Ecuaciones constitutivas*
  - *Objetivos*
- Método computacional
  - *Descripción algoritmo FDTD*
  - *Condiciones de estabilidad no lineales*
- Validación
  - *Soluciones analíticas*
  - *Resultados experimental*
- Conclusiones y Líneas de trabajo

INTRODUCCIÓN

1 Introducción
2 Método numérico
3 Validación analítica
4 Validación experimental
5 Conclusiones
6 Líneas de trabajo

- **Ecuaciones constitutivas** – leyes conservativas
  - Ecuación de continuidad (conservación de masa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

  - Ecuación de movimiento (conservación de momento)

$$\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v}\right) + \nabla p - \eta \nabla^2 \mathbf{v} - \left(\zeta + \frac{1}{3}\eta\right)\nabla(\nabla \cdot \mathbf{v}) = 0$$

  - Ecuación de estado termodinámico

$$p'(\rho, s) = c_0^2 \rho' + \frac{c_0^2}{\rho_0}\frac{B}{2A}\rho'^2 + \frac{c_0^2}{\rho_0^2}\frac{C}{6A}\rho'^3$$

INTRODUCCIÓN

1 Introducción
2 Método numérico
3 Validación analítica
4 Validación experimental
5 Conclusiones
6 Líneas de trabajo

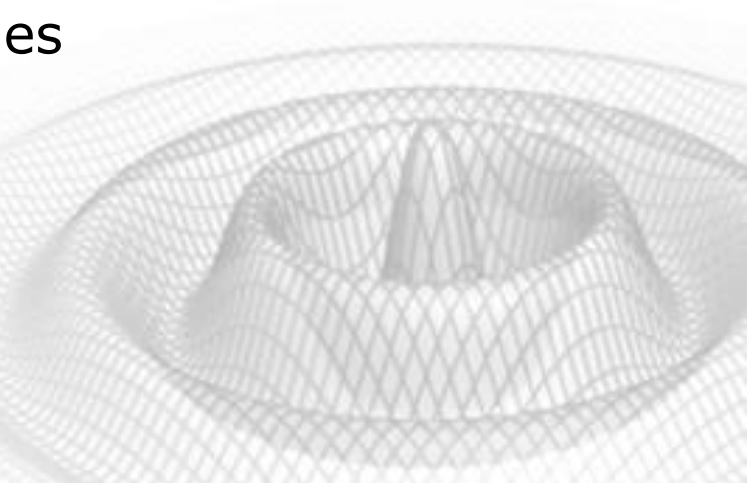
Objetivos

- Desarrollar un método computacional para resolver las ecuaciones constitutivas para acústica no lineal

✓ **Efectos no lineales**
✓ Inhomogeneidades en el medio

✓ Condiciones de contorno e iniciales arbitrarias
✓ Sin aproximaciones paraxiales
✓ Incorporar backscattering

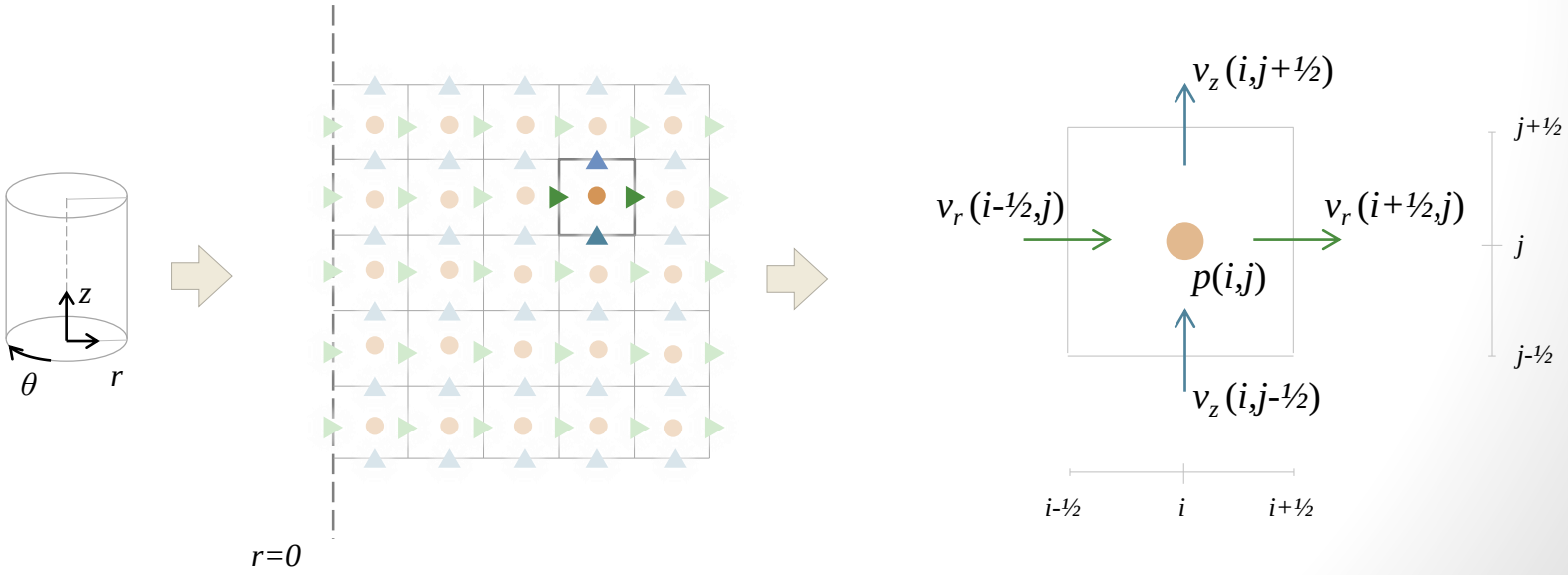
✓ **2.5D** (extensible a 3D)



MÉTODO COMPUTACIONAL

1 Introducción
2 Método numérico
3 Validación analítica
4 Validación experimental
5 Conclusiones
6 Líneas de trabajo

- **Algoritmo:**
  - FDTD: Diferencias finitas en dominio temporal
- **Discretización de los campos acústicos:**
  - Presión y velocidad al tresbolillo



MÉTODO COMPUTACIONAL

- **Algoritmo:**
  - FDTD: Diferencias finitas en dominio temporal

- **Discretización conservativa:**
  - Las leyes conservativas se han de cumplir para todas las celdas:
    - Sustituir operadores diferenciales por diferencias finitas centradas en espacio y tiempo
    - Promedio espacio-temporal de los términos necesarios

  - Aparición de términos implícitos en las ecuaciones discretas

$\rho(n+1,i,j)$ *es función de* $\rho(n,i,j)$ *(explicito)*

además de $\rho(n+1,i+1,j)$, $\rho(n+1,i,j+1)$, $\rho(n+1,i,j+1)$ *(implícito)*

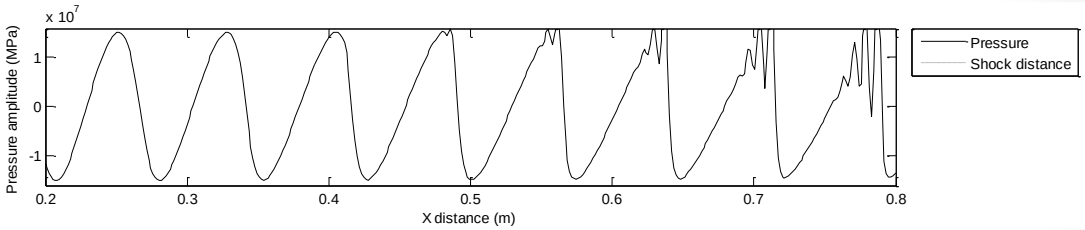
MÉTODO COMPUTACIONAL

- **Algoritmo:**
  - FDTD: Diferencias finitas en dominio temporal
- **Estrategia de resolución: Algoritmo iterativo**
  - Valor inicial: Solución lineal del sistema de manera explicita (FDTD)
  - Tras pocas iteraciones el algoritmo converge a la solución no lineal
    - 2 iteraciones → -100dB error relativo
- **Condiciones de contorno absorbentes**
  - Adaptación del método PML (*perfectly matched layers*) y *complex coordinate stretching* al régimen no lineal sobre geometría curvilínea

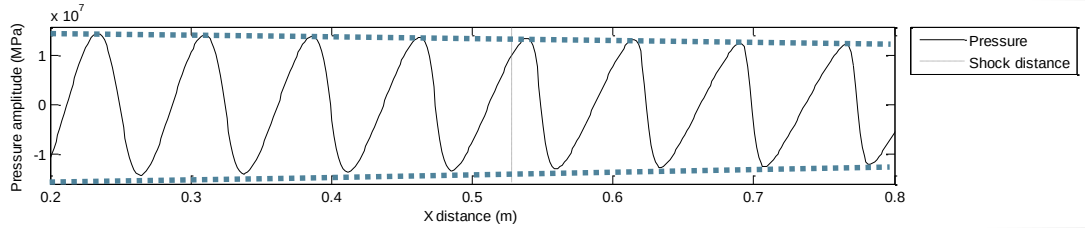
CONDICIONES DE ESTABILIDAD LINEAL + NO LINEAL

- **Control de los armónicos superiores y discontinuidades**
  - Aliasing espacial para longitudes de onda $\lambda_{min}=2\Delta h$

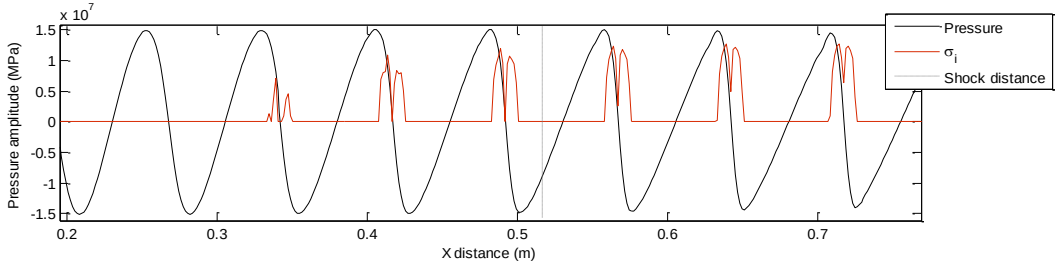
Sin control de la estabilidad no lineal
× desastroso!!!



Con viscosidad artificial (afecta a toda la solución)
× difusivo ↑↑

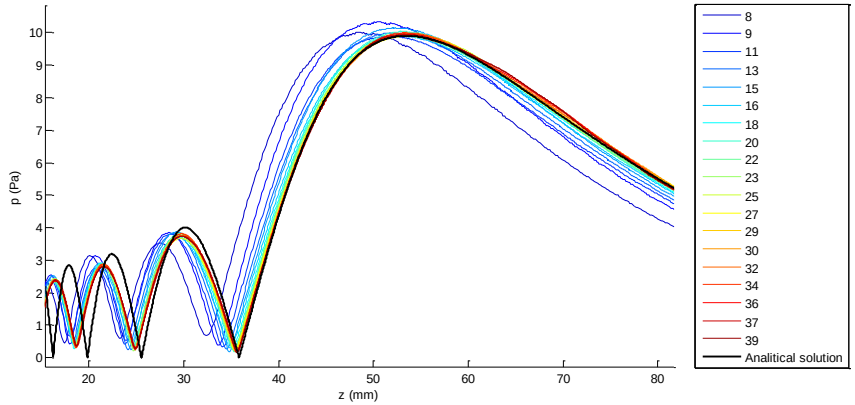


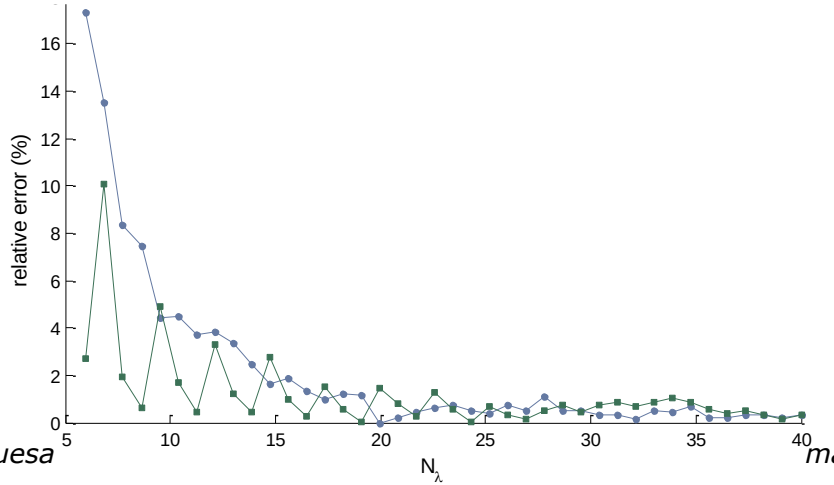
Con viscosidad artificial localizada (detector no lineal)
✓ conserva solución
✓ atenuación sólo choque



VALIDACIÓN ANALÍTICA

- **Convergencia en Régimen LINEAL**
  - Solución analítica a para un transductor focalizado (O'Neil, 1949)





malla gruesa *malla fina*

f_0= 1.2MHz
$N_{fresnel}$= 2,9

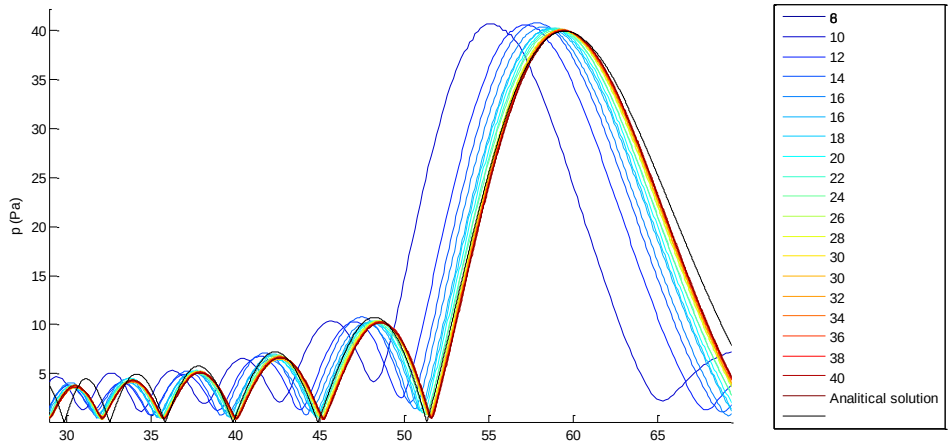
R= 60mm
2a= 60mm

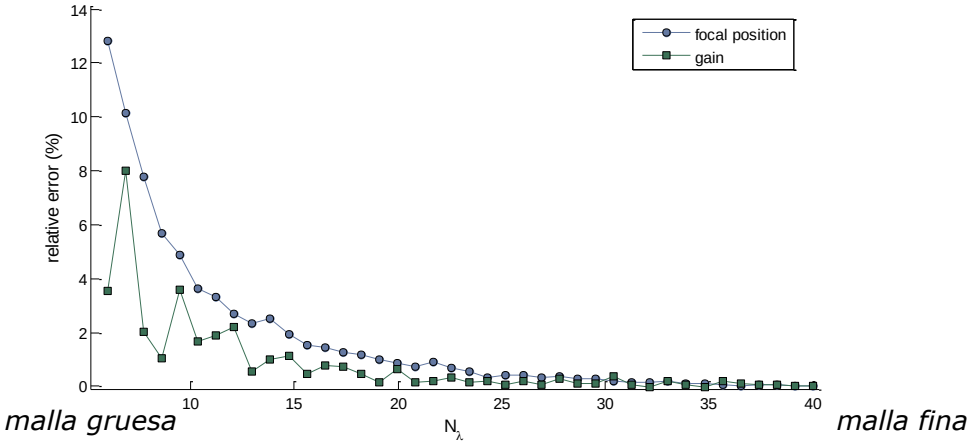
N_λ > 20 elementos / λ

error focal < 1 %
error ganancia< 1 %

VALIDACIÓN ANALÍTICA

- **Convergencia en Régimen LINEAL**
  - Solución analítica a para un transductor focalizado (O'Neil, 1949)





malla gruesa *malla fina*

f_0= 1.2MHz
$N_{fresnel}$= 11.8

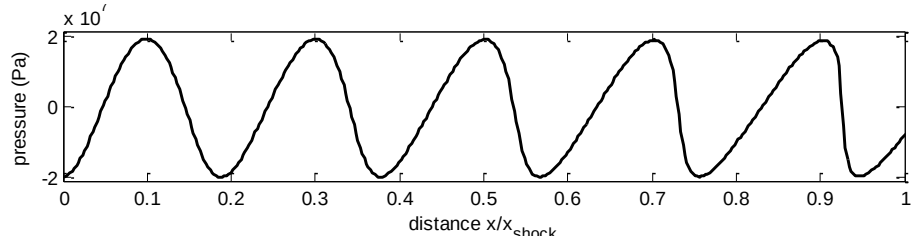
R= 60mm
2a= 60mm

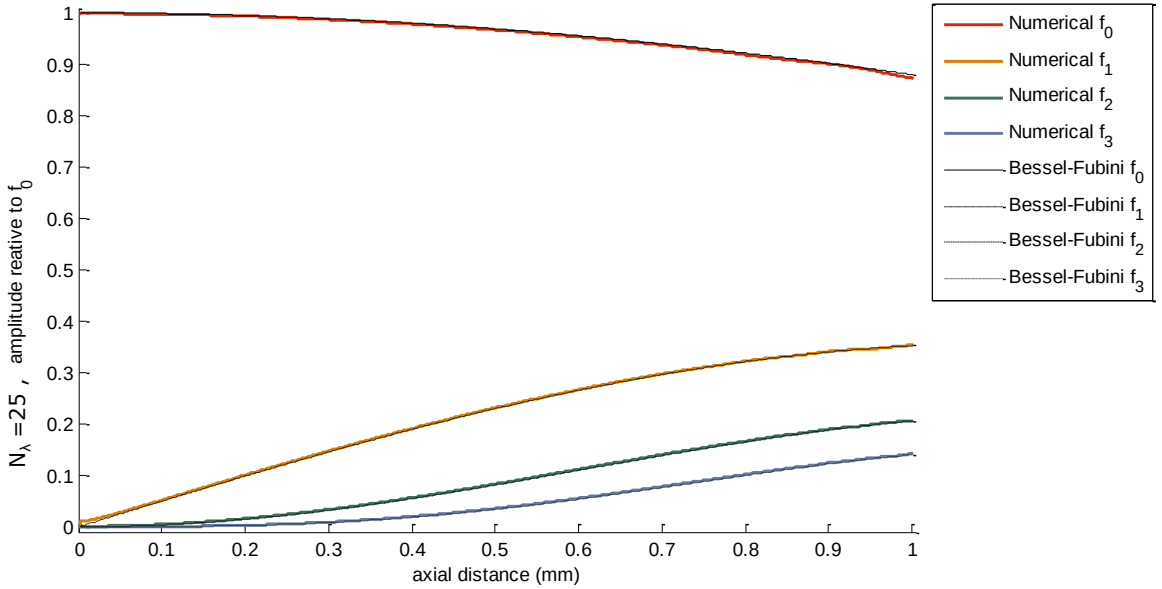
N_λ > 20 elementos / λ

error focal < 1 %
error ganancia< 1 %

VALIDACIÓN ANALÍTICA

- **Convergencia en Régimen NO LINEAL**
- Onda plana sin disipación región pre-shock (Sol. Bessel-Fubini)

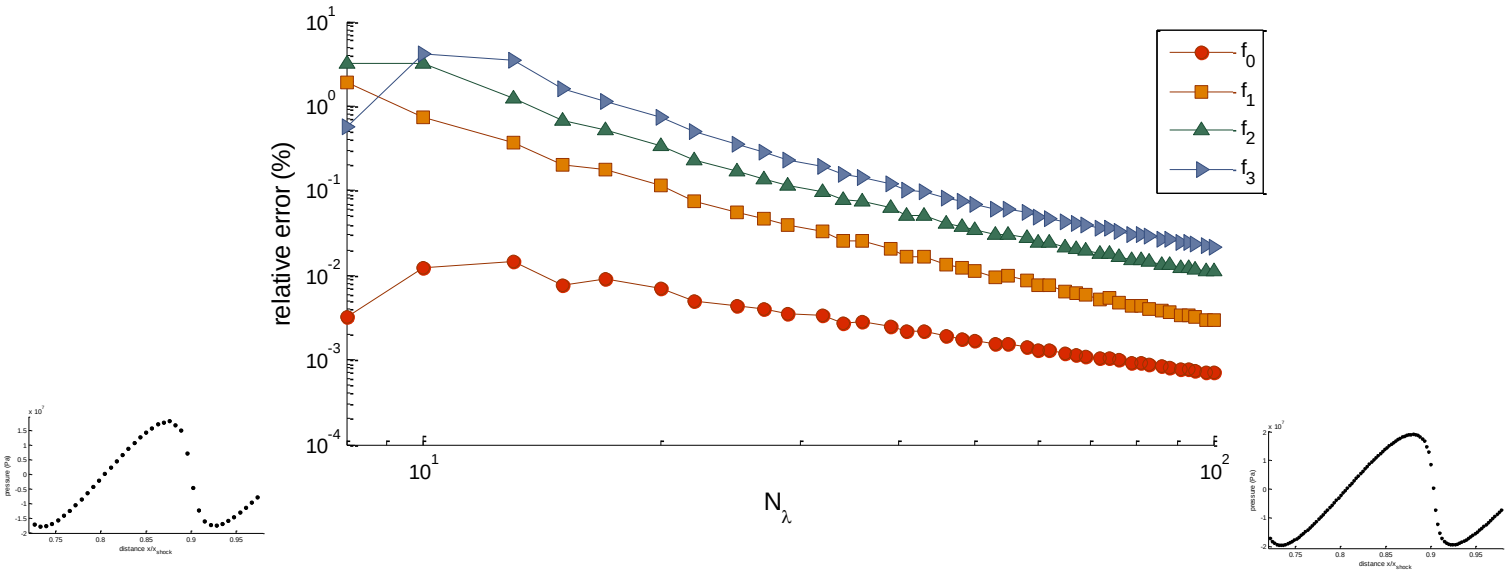




$$b_{n,BF} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2J_n(n\sigma)}{n\sigma}$$

VALIDACIÓN ANALÍTICA

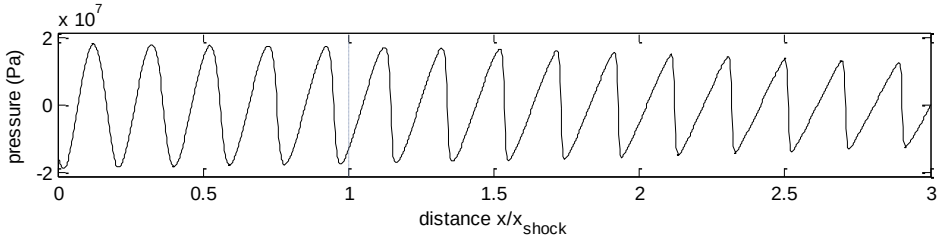
- **Convergencia en Régimen NO LINEAL**
- Onda plana sin disipación región pre-shock (Sol. Bessel-Fubini)

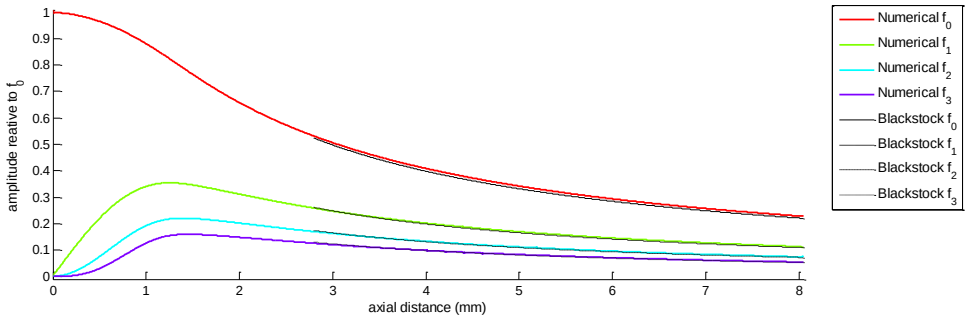


N_λ >22 elementos / λ
error relativo < 1 % para todos los armónicos

VALIDACIÓN ANALÍTICA

- **Convergencia en Régimen NO LINEAL**
- Onda plana con disipación en la región de postshock (Sol. Blackstock)





$$b_{n,B} = \frac{2}{\Gamma}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1-\left(n/\Gamma^2\right)\coth\left(n(1+\sigma)/\Gamma\right)}{\sinh\left(n(1+\sigma)/\Gamma\right)}$$

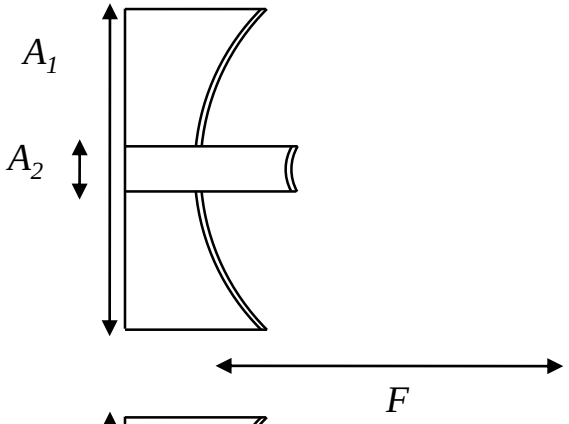
- N_λ =30 elementos / λ
  - error relativo < 2.80% para todos los armónicos

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Dispositivo focalizado HMI** (Harmonic Motion Imaging)
- Monitorización terapia HIFU

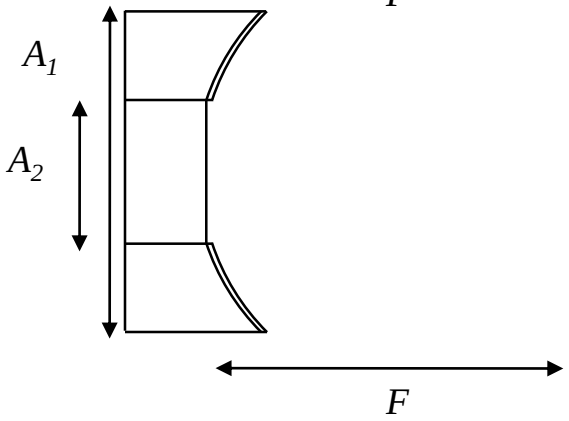
A_1= 70 mm
F= 50 mm
f_0= 4.5 MHz

f_{number}=0.7



A_1= 70 mm
A_2= 45 mm

F= 50 mm
f_0= 4.5 MHz



VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

1 Introducción

2 Método numérico

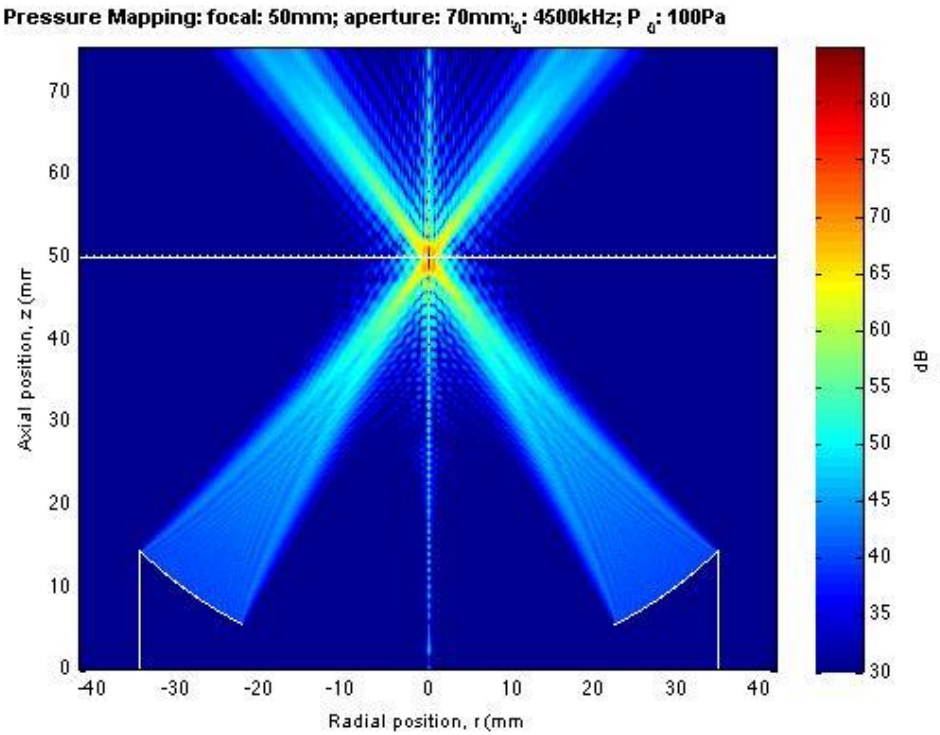
3 Validación analítica

4 Validación experimental

5 Conclusiones

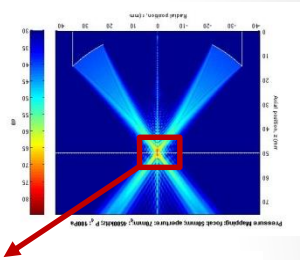
6 Líneas de trabajo

- **Dispositivo focalizado HMI** (Harmonic Motion Imaging)
- Monitorización terapia HIFU

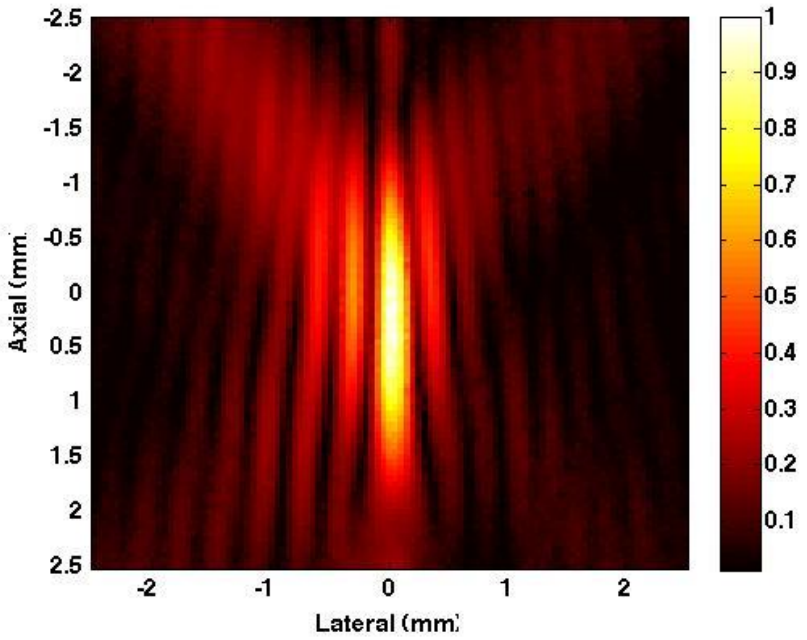


VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

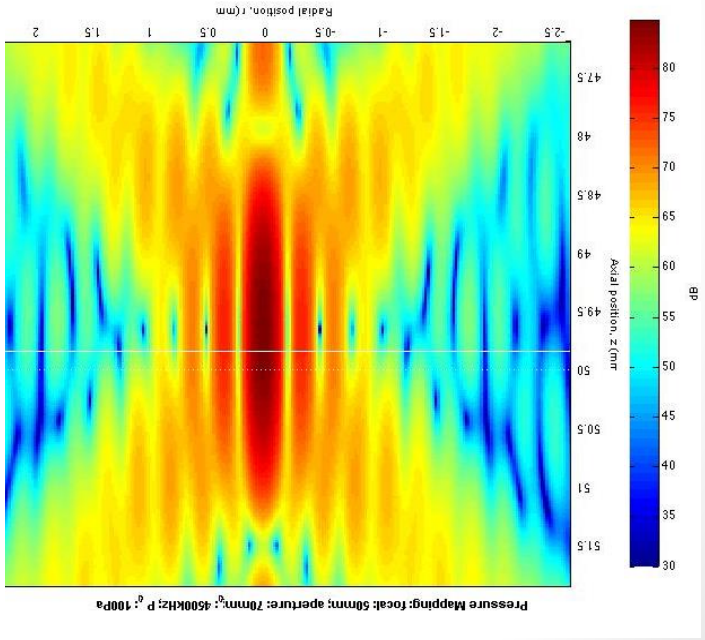
- **Dispositivo focalizado HMI** (Harmonic Motion Imaging)
- Monitorización terapia HIFU



Experimento



Simulación



VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

1 Introducción

2 Método numérico

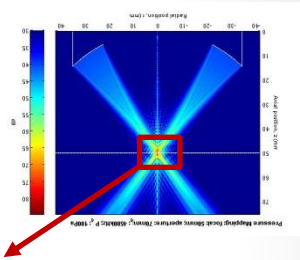
3 Validación analítica

4 Validación experimental

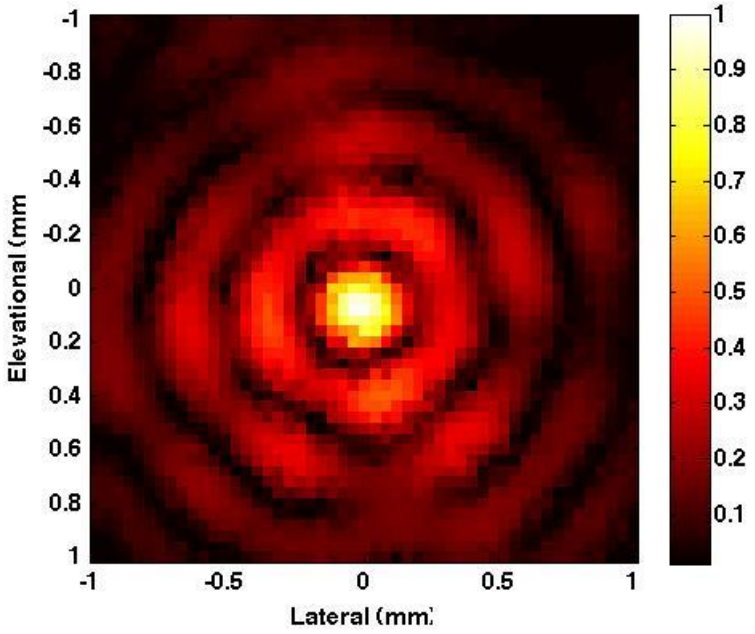
5 Conclusiones

6 Líneas de trabajo

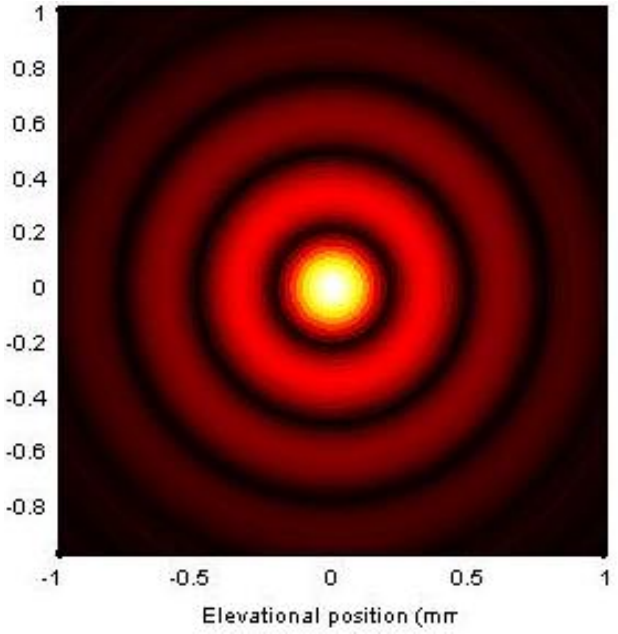
- **Dispositivo focalizado HMI** (Harmonic Motion Imaging)
- Monitorización terapia HIFU



Experimento

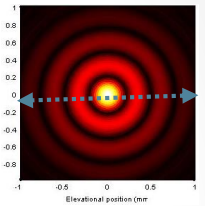


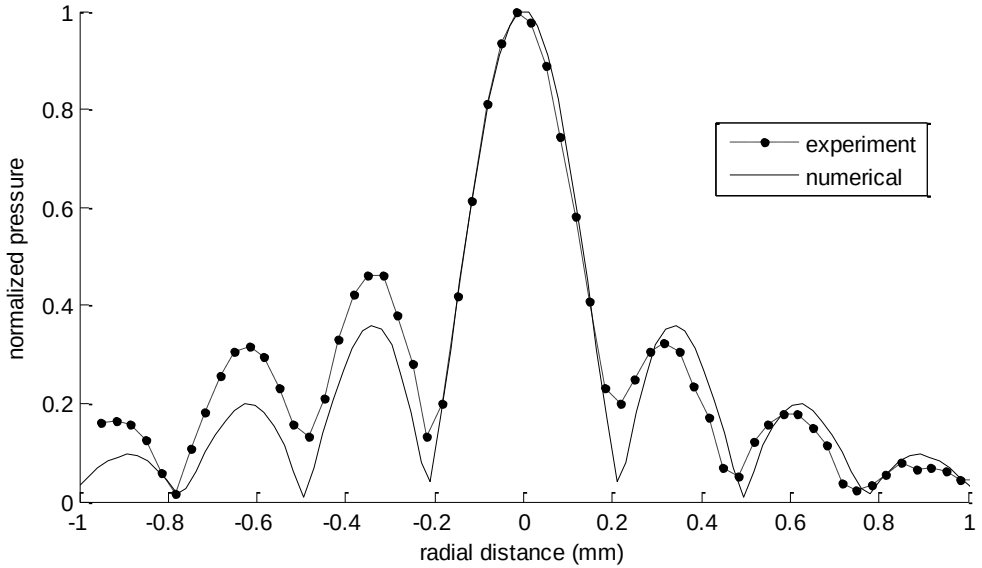
Simulación



VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Dispositivo focalizado HMI** (Harmonic Motion Imaging)
- Monitorización terapia HIFU



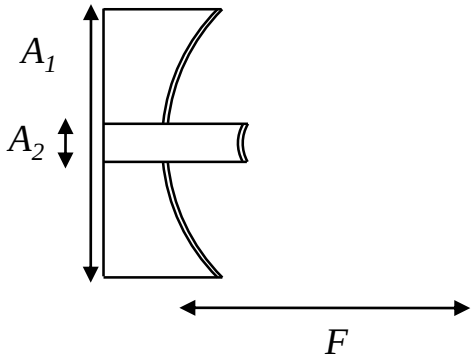


VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Dispositivo focalizado BBBD** (Blood Brain Barrier Disruption)
- Monitorización terapia apertura de la barrera hematoencefálica

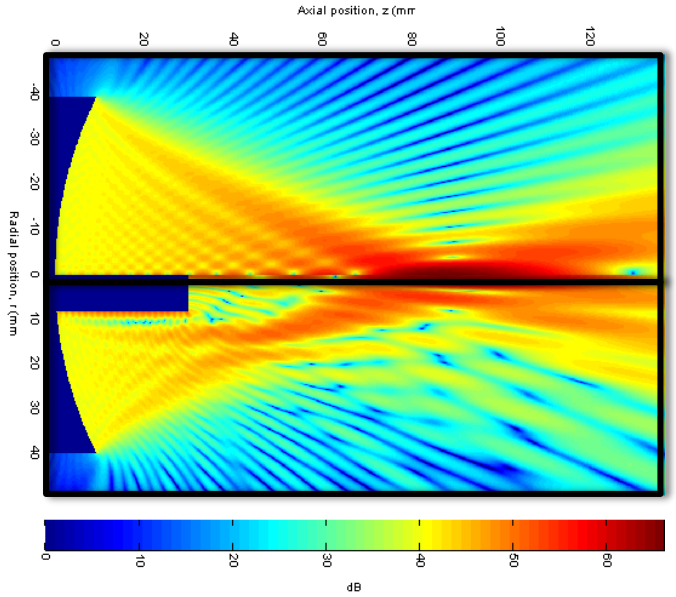
A_1= 80 mm
A_2= 16.5 mm
F= 90 mm
f_0= 500 kHz

f_{number}=1.25



Completo

A-scan



VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

1 Introducción

2 Método numérico

3 Validación analítica

4 Validación experimental

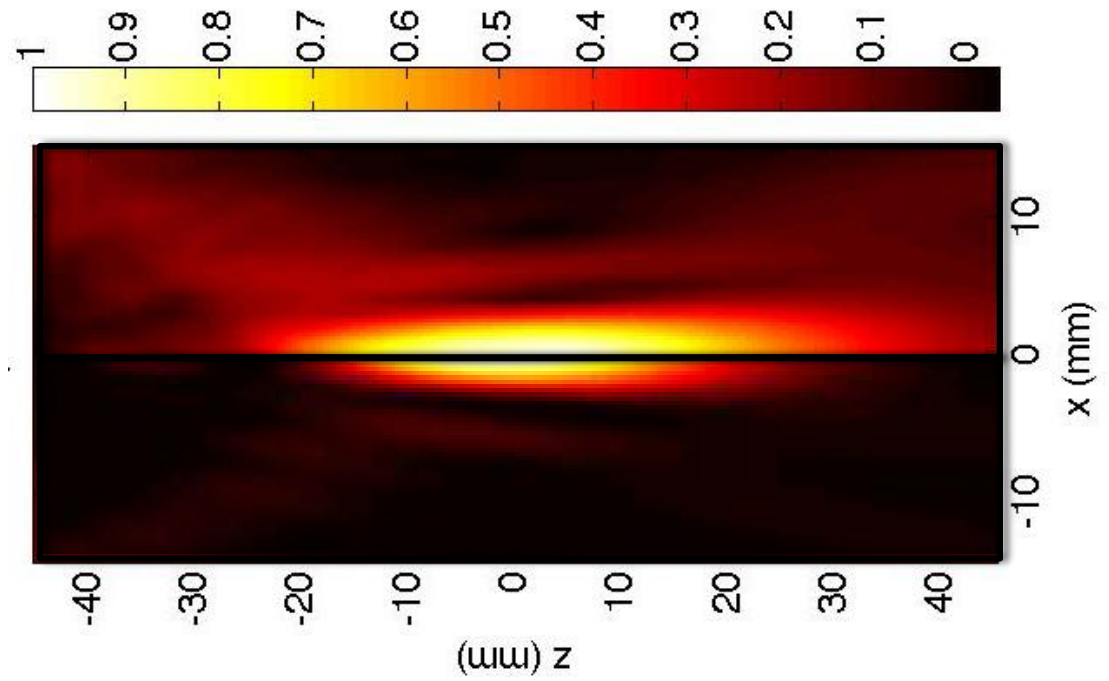
5 Conclusiones

6 Líneas de trabajo

- **Dispositivo focalizado BBBD** (Blood Brain Barrier Disruption)
- Monitorización terapia apertura de la barrera hematoencefálica

Experimento

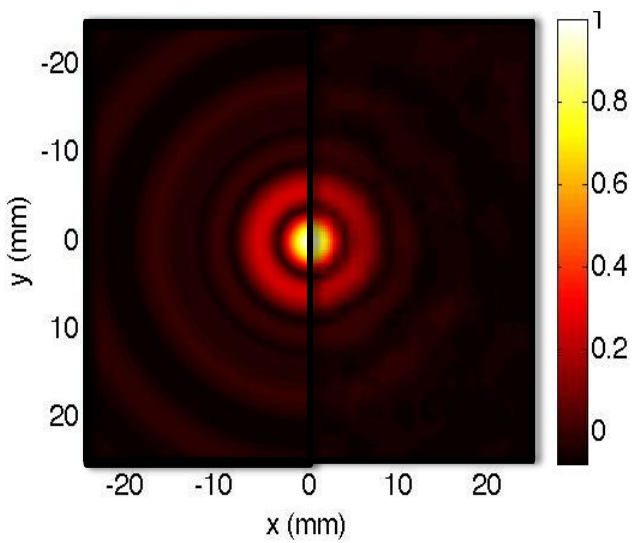
Simulación



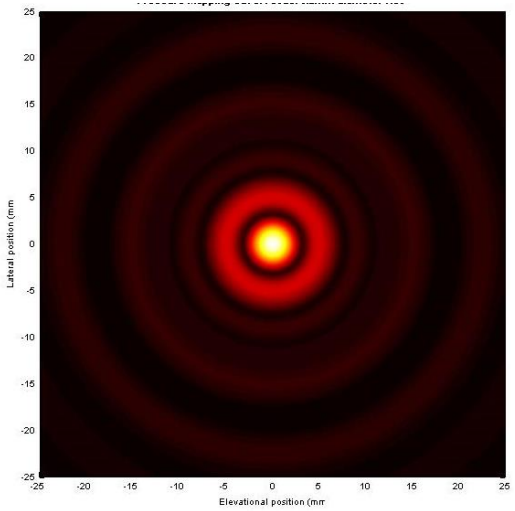
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Dispositivo focalizado BBBD** (Blood Brain Barrier Disruption)
- Monitorización terapia apertura de la barrera hematoencefálica

Simulación Experimento



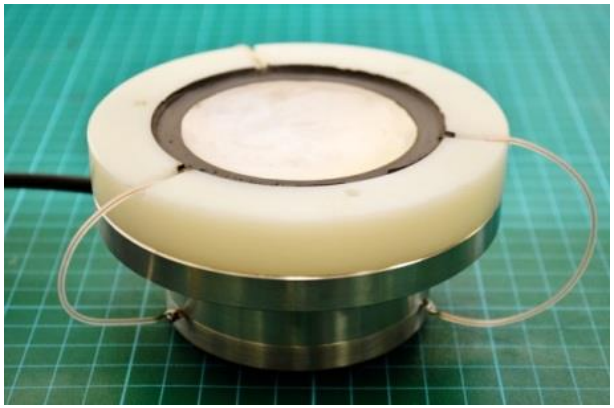
Experimento Simulación

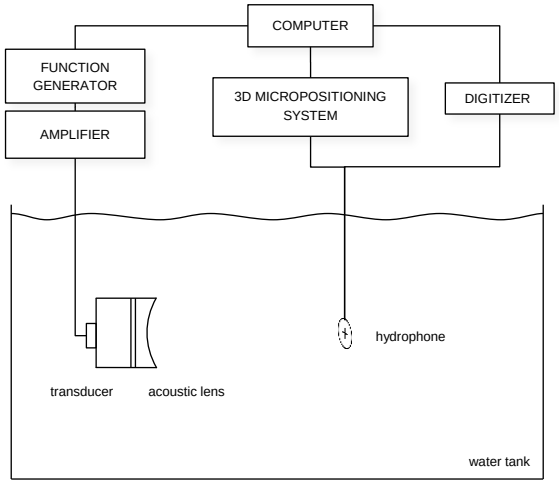


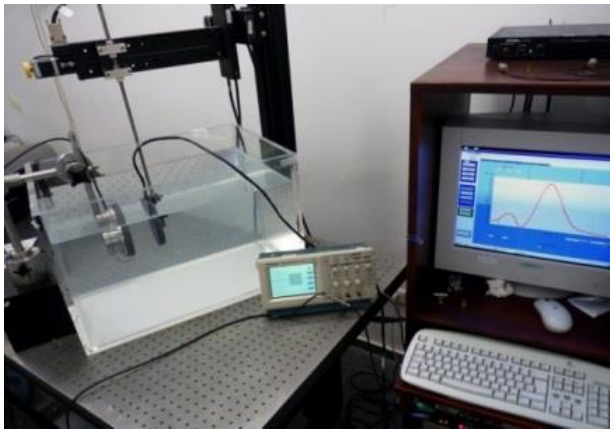
VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Dispositivo focalizado**

- Focal: 63 mm
- Apertura: 64 mm
- f_0: 1.1 MHz

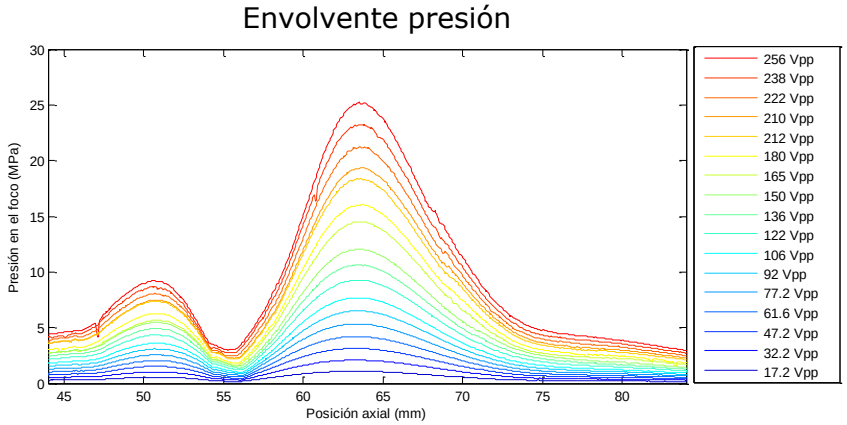


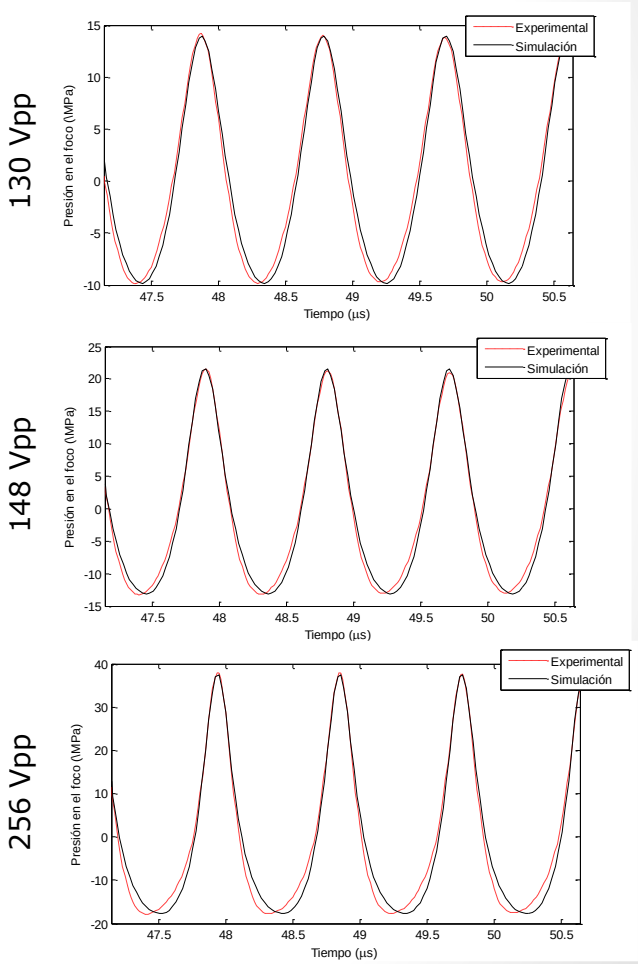




VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

- **Formas de onda:**
  - Distorsión asimétrica de la forma de onda en la zona focal
  - Resolución frecuencial diferente (20 MHz exp. vs. 13.8 MHz sim.)
  - error relativo amplitud < 2%





CONCLUSIONES

1 Introducción
2 Método numérico
3 Validación analítica
4 Validación experimental
5 Conclusiones
6 Líneas de trabajo

Método numérico apto para la simulación de campos acústicos en régimen no lineal:

- ✓ **Efectos no lineales**
- ✓ **2.5D** (extensible a 3D)
- ✓ Inhomogeneidades en el medio
- ✓ Condiciones de contorno e iniciales arbitrarias.
- ✓ Sin aproximaciones paraxiales,
- ✓ Backscattering
- ✓ PML para eliminar las reflexiones contornos del dominio
- ✓ Condiciones de estabilidad robustas (difusivas)

Validación:

- ✓ Solución contrastada con **soluciones analíticas** (N=22, error <1%)
- ✓ Solución contrastada con **resultados experimentales** para transductores focalizados de potencia

LÍNEAS DE TRABAJO

1 Introducción

2 Método numérico

3 Validación analítica

4 Validación experimental

5 Conclusiones

6 Líneas de trabajo

Experimental:

- Desarrollar medidas exhaustivas para contrastar las predicciones numéricas

Computacional:

- Extender a 3D cartesianas
- Desarrollar modelado numérico mediante técnicas pseudo-spectrales (PSTD)
- Condiciones de estabilidad no lineal mediante esquemas no difusivos
- Paralelizar FDTD (*local, GPU, cluster*)

Modelado:

- Conducción térmica - temperatura en tejido
- Absorción de tejidos biológicos

REFERENCIAS

1) R. O. Cleveland, M. F. Hamilton, D. T. Blackstock. "Time-domain modeling of finite-amplitude sound in relaxing fluids" *J. Acoust. Soc. Am.* 99 (6), (1996)
1) T. Christopher, ''Finite amplitude distortion-based inhomogeneous pulse echo ultrasonic imaging'' *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 44, 125-139 (1997)
2) Lee, Y. S. Hamilton, M. F. ''Time-domain modeling of pulsed finite amplitude sound beams'' *J. Acoust. Soc. Am*. 97, 906-917 (1995)
3) Yang, X.; Cleveland, R. O."Time domain simulation of nonlinear acoustic beams generated by rectangular pistons with application to harmonic imaging." *J. Acoust. Soc. Am*.117:113 (2005)
4) Hallaj, I. M.; Cleveland, R. O. "FDTD simulation of finite-amplitude pressure and temperature fields for biomedical ultrasound." *J. Acoust. Soc. Am.* 105:7 (1999)
5) Botteldooren, D. "Numerical model for moderately nonlinear sound propagation in three-dimensional structures" *J. Acoust. Soc. Am.* 100:3 (1996)
6) Ginter, S. et al. "Full-wave modeling of therapeutic ultrasound: Nonlinear ultrasound propagation in ideal fluids" *J. Acoust. Soc. Am.* Vol. 111:5, 2049-2059 (2002)
7) Nabavi, M.; Kamran, M. H.; Dargahi, J. "A fourth-order accurate scheme for solving one-dimensional highly nonlinear standing wave equation in different thermoviscous fluids" *Journal of Computational Acoustics,* Vol. 16, No. 4 563–576 (2008)
8) Vanhille, C.; Campos-Pozuelo, C. "Numerical simulation of two-dimensional nonlinear standing waves" *J. Acoust. Soc. Am.* 116:194-200 (2004)
9) K. A. Naugolnykh and L. A. Ostrovskii. *Nonlinear Wave Processes in Acoustics*. Cambridge University Press, New York, NY. (1998)
10) A. Taflove and S. Hagness. *Computational Electrodynamics. The Finite Difference Time Domain method,* 3ª ed. North Artech House Inc. (2005)
11) Liu, Q. H.; "Perfectly matched layers for elastic waves in cylindrical and spherical coordinates" *J. Acoust. Soc. Am.* 105:4 (1999)
12) Lax, P.D; Wendroff, B. "Systems of conservation laws". *Commun. Pure Appl Math*. 13: 217–237 (1960)
13) R. J. LeVeque, *Numerical Methods for Conservation Laws*, Birkhauser-Verlag, Basel, Lectures in Mathematics, ETH-Zurich, (1990)
14) Lax, P. D.; Richtmyer, R. D. "Survey of the stability of linear finite difference equations" *Comm. Pure Appl. Math.* 9, 267-293 (1956)
15) H. T. O'Neil. Theory of Focusing Radiators. *J. Acoust. Soc. Am.* 21(5), 516 (1949)
16) Mark F. Hamilton, David T. Blackstock. "Nonlinear Acoustics: Theory and Applications". *Academic Press;* 1st Edition (1997)

IGIC
Institut d'investigació per a la gestió integrada de zones costaneres

TECNIACUSTICA
Cáceres · 2011

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Gracias por su atención

Noé Jiménez

