

## I.1 - Ondas Elásticas en Sistemas Biológicos

El estudio de la propagación de ondas mecánicas en los materiales constituye una importante rama de la física.

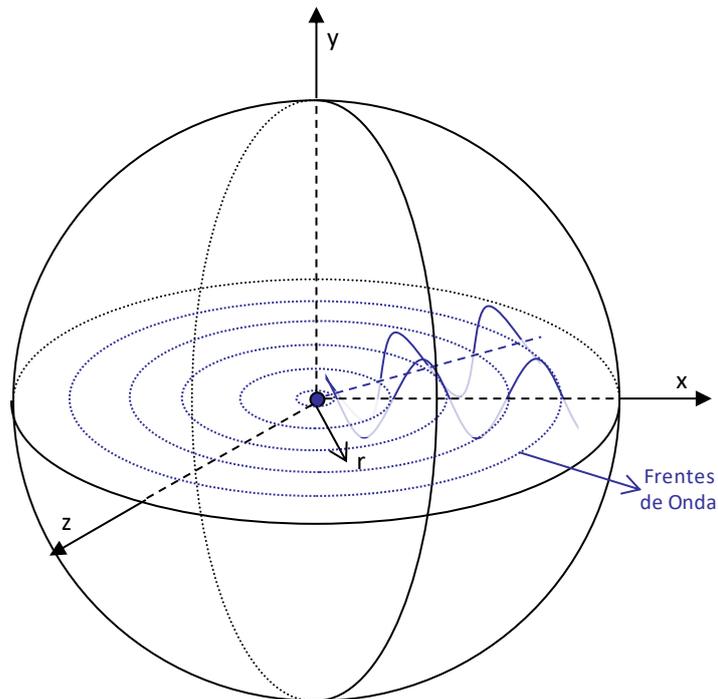
Las ondas mecánicas necesitan un medio físico para transportarse. Son perturbaciones de la posición de volúmenes diferenciales de un material, que se propagan a través de éste según sus propiedades.

Durante el desplazamiento de una onda esférica en una dirección arbitraria (Figura 1), un parámetro arbitrario  $\xi$  (puede representar, por ejemplo, el desplazamiento) varía según la ecuación (1), donde  $x$ ,  $y$  y  $z$  son las direcciones ortogonales,  $t$  es el parámetro de tiempo y  $v$  es la velocidad de propagación de la onda:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

que, en coordenadas radiales, puede expresarse según la ecuación (2), donde  $r$  es el radio:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = v^2 \cdot \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial r} \right) \quad (2)$$



**Figura 1** - Desplazamiento de una onda esférica. Línea punteada: frentes de onda.  $(x,y,z)$ : coordenadas cartesianas;  $(r)$ : coordenada polar.

### I.1.1 - Ondas Elásticas en un Medio Finito

Para analizar el desplazamiento  $u$  de una onda, se reemplaza por  $\xi$  en la ecuación (1). Si se consideran las coordenadas  $x_i$ , una onda con desplazamiento  $u$  en dirección  $x$ ,  $u_i = u_i(x_i, t)$ , se rige según la ecuación (3):

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = C_{ijkl} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x_j \cdot \partial x_k} \quad (3)$$

donde  $\rho$  es la densidad del medio en el que se propaga la onda y  $C_{ijkl}$  es el tensor de constantes elásticas.

La ecuación (3) puede reescribirse en términos del tensor de Christoffel  $\Gamma_{il}$  y del vector polarización  $p_i$ :

$$\rho \cdot v^2 \cdot p_i = \Gamma_{il} \cdot p_i = C_{ijkl} \cdot x_j \cdot x_k \cdot p_i \quad (4)$$

Las velocidades y las polarizaciones de las ondas son los autovalores y autovectores de una onda que se propaga en dirección  $\vec{x}$ .

El vector velocidad puede descomponerse en dos velocidades, longitudinal y transversal:  $\vec{u} = \vec{u}_l + \vec{u}_t$ . Se cumple que  $\nabla \cdot \vec{u}_l = 0$  y  $\nabla \times \vec{u}_t = 0$ .

### I.1.2 - Módulo de Young

La ecuación constitutiva de un material elástico (sólido Hookoneano) relaciona la tensión generada en el material y con su deformación según la Ley de Hooke (ecuación (5)):

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot e_{kl} \quad (5)$$

donde  $\sigma_{ij}$  es el tensor de tensión,  $C_{ijkl}$  es el tensor de constantes elásticas y  $e_{kl}$  es el tensor de deformaciones. Para el caso de un material isotrópico, la ecuación (6) se simplifica:

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot e_{\alpha\alpha} \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot e_{ij} \quad (6)$$

donde  $e_{\alpha\alpha} \cdot \delta_{ij} = e_{ii} + e_{jj} + e_{kk}$ , y  $\mu$  y  $\lambda$  son los coeficientes de Lamé de cizalla y de compresión, respectivamente. De la solución de la ecuación (6) para  $e_{ij}$  surge una de las definiciones del Módulo de Young  $E$ :

$$E = \mu \cdot \frac{3 \cdot \lambda + 2 \cdot \mu}{\lambda + \mu} \quad (7)$$

En un material blando, la resistencia a la compresión es mucho mayor que el de cizalla **Error! Reference source not found.**, es decir  $\lambda \gg \mu$ . Así, la ecuación (7) se simplifica:

$$E = 3 \cdot \mu \quad (8)$$

A su vez el módulo de cizalla  $\mu$  es función de la velocidad de la onda de cizalla  $c_s$  del material, y de la densidad del medio en el que se propaga  $\rho$ :

$$\mu = \rho \cdot c_s^2 \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (8) en la ecuación (9), resulta:

$$E = 3 \cdot \rho \cdot c_s^2 \quad (10)$$

y, dado que la densidad del material es generalmente conocido o fácil de obtener, sólo resta calcular la velocidad de propagación de la onda de cizalla para obtener las características mecánicas del material bajo estudio.

### 1.1.3 - Ondas de Compresión y Cizalla

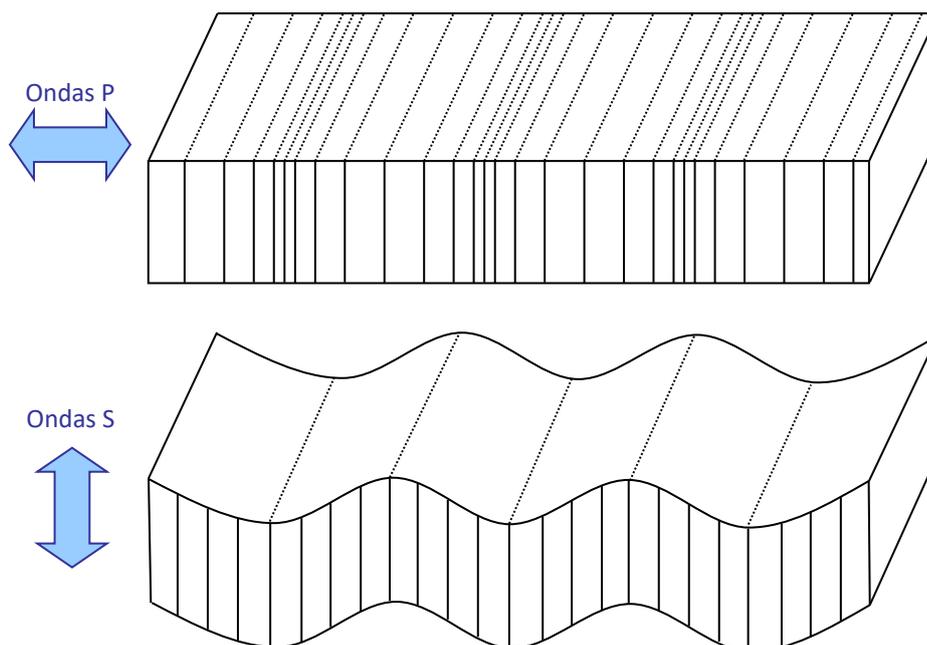
Al producir una perturbación en la superficie de un material, existen ondas de distintas características que vale diferenciar. Su denominación surge del estudio de las ondas sísmicas (ver Figura 2). La Figura 1 muestra una onda cuya amplitud es transversal a la dirección de propagación. Las ondas pueden trasladarse transversal o longitudinalmente.

#### Ondas P

Las ondas P (*primarias*) son ondas longitudinales, es decir que las partículas se deforman en la misma dirección de la propagación. Genera tensiones de *compresión* en el material en el cual se desplaza.

#### Ondas S

Las ondas S (*secundarias*) son transversales, y generan tensiones de *corte* (cizalla) en el material en el cual se desplazan.



**Figura 2** - Desplazamiento de una onda P (panel superior) y de una onda S (panel inferior) a través de un material. Las tensiones generadas son de compresión y de corte, respectivamente.

La velocidad de desplazamiento de las ondas P es sensiblemente mayor que la de las ondas S, de ahí su denominación *primaria* y *secundaria*: en ese orden se detectan las ondas sísmicas.

Como indica la Ecuación (10), al calcular la velocidad de la onda de cizalla que se traslada en un material, podría obtenerse el valor de la elasticidad del material observado.

## I.2 - Ultrasonido

Las técnicas de ultrasonido (US) se basan en enviar señales a través de un medio y analizar sus reflexiones para obtener información de dicho medio.

El ultrasonido se propaga como una onda de compresión a través de los materiales según la resistencia que éstos le opongan. Dichas ondas son generadas por la vibración de elementos piezoeléctricos a alta frecuencia (entre 20 kHz y 500 MHz). Las ondas emitidas son reflejadas en las imperfecciones del medio, y por lo tanto la onda recibida cambia en función de las características del material en observación.

Las técnicas de diagnóstico por imágenes que utilizan ultrasonido tienen la ventaja de ser repetibles, no invasivas e inoñas. Por el otro lado, estos métodos tienen la desventaja de sólo ser capaces de medir dimensiones y desplazamientos.

A continuación, se enumerarán brevemente las principales técnicas que utilizan ultrasonido aplicado en los sistemas biológicos.

### I.2.1 - Ecografía

La técnica de ecografía cuantifica los cambios en las propiedades acústicas de las interfases dentro del medio, y es el análisis de la onda reflejada, o *eco*, lo que permite componer una imagen.

El ultrasonido es una onda de compresión que se traslada en un medio según la resistencia que éste le oponga. Esa característica del medio se conoce como *impedancia acústica*, la relación entre la presión y la velocidad de una partícula del medio, y se define según la ecuación (10):

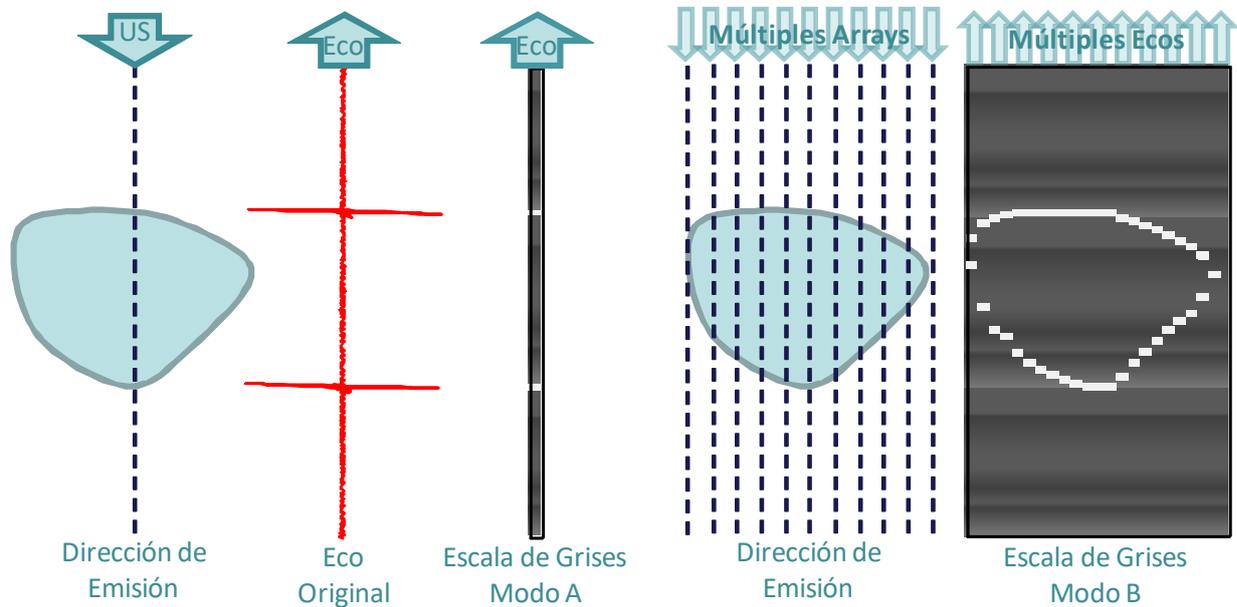
$$Z = \rho \cdot c \quad (11)$$

donde  $\rho$  es la densidad y  $c$  la velocidad del sonido en el medio. La Tabla 1 muestra los valores de densidad, velocidad del sonido e impedancia acústica de algunos materiales biológicos.

**Tabla 1** - Propiedades acústicas de los tejidos

<b>Tejido / Material</b>	<b>Densidad [gr/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>Velocidad del Sonido [m/s]</b>	<b>Impedancia Acústica [kg.(s.m<sup>2</sup>)].10<sup>6</sup></b>
Agua	1	1480	1.48
Sangre	1.005	1575	1.66
Grasa	.95	1450	1.38
Hígado	1.06	1590	1.69
Riñón	1.05	1570	1.65
Cerebro	1.03	1550	1.60
Corazón	1.045	1570	1.64
Músculo (longitudinal)	1.065	1575	1.68
Músculo (transversal)	1.065	1590	1.69
Piel	1.15	1730	1.99
Ojo (lente)	1.04	1650	1.72
Ojo (humor vítreo)	1.01	1525	1.54
Hueso (ondas longitudinales)	1.9	4080	7.75
Hueso (ondas de corte)	1.9	2800	5.32

La ecografía puede utilizarse en distintas modalidades. El *Modo A* grafica la amplitud de la onda reflejada en una escala monocromática (ver Figura 3, paneles centrales). Cuando se usan varios transductores dispuestos en hilera en simultáneo, puede formarse una imagen bidimensional, esta técnica se llama *Modo B* (Figura 3, panel derecho). La ecografía en *Modo Doppler* combina la ecografía en Modo B con un análisis entre tiempos consecutivos de la señal reflejada del US para obtener un campo de velocidades, generalmente utilizado para observar y medir flujos.



**Figura 3** - Un haz de ultrasonido en dirección de un elemento a observar (panel izquierdo). El haz se refleja en las interfaces donde existe diferencia de impedancia acústica, generando un eco, permitiendo medir las distancias entre la superficie y las interfaces (paneles centrales). Cuando se utilizan varios transductores en simultáneo se logra una imagen en dos dimensiones conocido como Modo B (panel derecho).

El uso de imágenes por ultrasonido en la clínica es extenso, por ser no invasivo, poco costoso y en muchos casos de fácil transporte y de gran disponibilidad. En el diagnóstico por imágenes, la ecografía es utilizada como medio para componer imágenes de áreas que serían inaccesibles de manera no-invasiva. El hecho de ser tecnología que utiliza US en lugar de rayos X o  $\gamma$  la hace atractiva al no tener potenciales efectos secundarios producto de la exposición a radiación, como sí las tienen técnicas como las radiografías, las tomografías computadas o PET.

Si se analizan imágenes en Modo A a través del tiempo (*Modo M*), se puede evaluar movimientos (ver Figura 4). Esto es especialmente útil en la clínica para observar elementos del sistema cardiovascular cuyo análisis de movimiento da información acerca de su funcionamiento (por ejemplo, válvulas, espesores parietales del corazón, etc).

### **Limitaciones de la Ecografía**

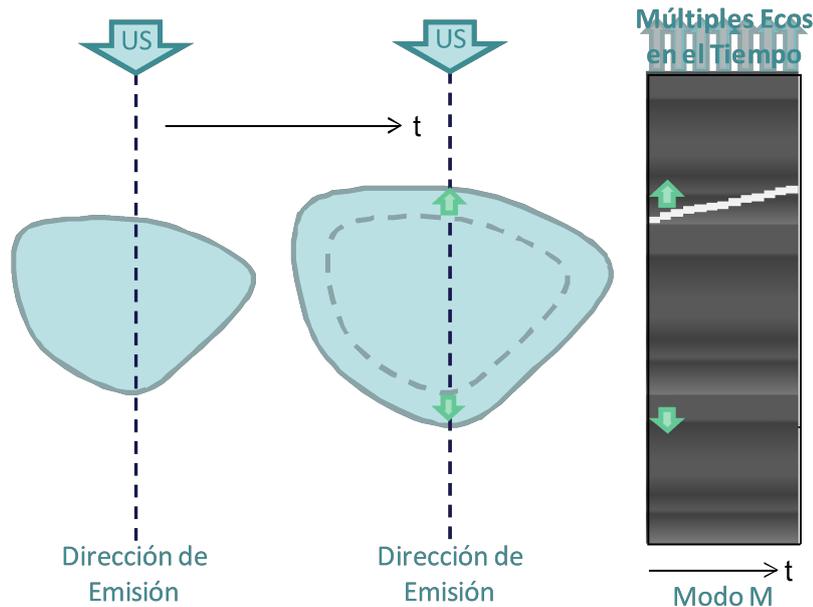
Como el ultrasonido es una onda de compresión, se traslada en el medio según la resistencia que éste le presenta. Hay ciertos materiales que presentan la misma resistencia a la compresión que otros, y por lo tanto su contraste en una imagen ecográfica es mínimo, haciéndolos indistinguibles o "invisibles" a la ecografía. En la Tabla 1 se detallan las impedancias acústicas de varios tejidos, y puede apreciarse que muchos de ellos tienen impedancias similares, reduciendo el poder de resolución o de distinción entre tejidos. La

Figura 5 muestra este problema en términos del módulo de compresión (detallado más adelante).

Otra limitación de la ecografía en la clínica es que sólo permite medir dimensiones y todas las conclusiones deben basarse en esas mediciones.

### 1.2.2 - Modo A en Otras Aplicaciones

Si se analizan ecografías en Modo A consecutivas, puede generarse una imagen Modo M *temporal*, con el objetivo de estudiar desplazamientos a través del tiempo. Ver Figura 4.



**Figura 4** - El análisis de señales en Modo-A consecutivas permite observar cambios a través del tiempo.

Este método se utiliza para la evaluación de los parámetros mecánicos de las arterias. Los cambios de diámetro se analizan a partir de un algoritmo que detecta las interfaces utilizando las señales en Modo-A originales. Una medición simultánea de la presión interna de la arteria permite graficar el bucle P-D, para obtener luego los parámetros mecánicos, en particular el Módulo de Young  $E$ .

### 1.2.3 - Sistema Open

El sistema Open de Lecour Electronique utiliza emisores-receptores de US, combinado con un sistema totalmente abierto que permite programar el equipo para que realice funciones específicas y obtenga resultados alternativos a los usualmente obtenidos. Un ejemplo es calcular la elasticidad usando la técnica de elastografía (descrita más adelante).

El sistema permite además ajustar los parámetros propios del US (canales utilizados, ganancia, frecuencia de muestreo, etc.).

### 1.2.4 - Supersonic Shear Imaging (SSI)

El *Supersonic Shear Imaging* (SSI) es un método que utiliza US para estimar la elasticidad de los tejidos, a través del análisis de ondas de corte "guiadas". Mientras la onda de corte viaja perpendicularmente a la dirección de la onda de US, se registra su propagación.

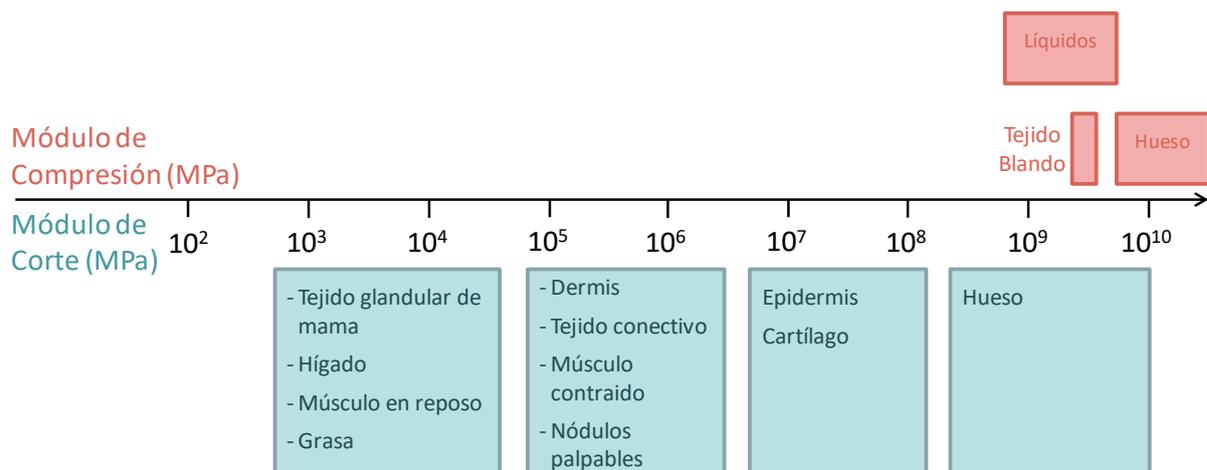
Como la amplitud de la onda de corte decrece con la distancia, se genera una onda cilíndrica y se focaliza el haz ultrasónico a distintas profundidades, variando el tiempo tras el cual se adquiere el eco. Se monitorea la propagación de la onda de corte y se analiza los cambios en las señales de los ecos.

La técnica de SSI se ha utilizado para determinar los parámetros mecánicos de tejidos tales como mama, músculo e hígado de manera no invasiva.

### 1.2.5 - Elastografía Transitoria

La elastografía es un método no invasivo de medición de elasticidad de los materiales basado en la emisión y recepción de ondas ultrasonoras, que se procesan para obtener la velocidad de onda de propagación de ondas secundarias y luego calcular el módulo de elasticidad según la ecuación (10).

Mientras que la ecografía está basada en la diferencia de impedancia acústica, la resistencia que un material opone a ondas de compresión, la elastografía está basada en la medición de desplazamientos que están relacionados con la resistencia al corte del material. La ventaja principal de la elastografía frente a la ecografía está basada en que la diferencia entre las resistencias al corte de ciertos materiales es mucho más amplia que la diferencia entre sus módulos de compresión; significa que la elastografía tiene una resolución mayor que la ecografía (ver Figura 5).



**Figura 5** - Variación de los módulos de compresión y de corte para distintos materiales biológicos. El módulo de corte tiene un rango (por lo tanto, un contraste) mayor al módulo de compresión.

La técnica consiste en enviar señales ultrasonoras de baja frecuencia que causan una perturbación al medio bajo estudio y simultáneamente emitir señales de alta frecuencia que se reflejan las inhomogeneidades del medio. Estas inhomogeneidades actúan como difusores de la onda de US de alta frecuencia, generando un *speckle acústico*. Al recibir y procesar estas señales, se pueden percibir los desplazamientos de dichos difusores a través del tiempo, producto de las perturbaciones de baja frecuencia.

El desplazamiento de los difusores está directamente relacionado con las propiedades mecánicas del medio.

La Elastografía permite establecer con una sola medición distintos materiales de distintas propiedades mecánicas.

### ***Elastografía en la Clínica***

Utilizar la elastografía como técnica de diagnóstico por imágenes es análogo a la palpación que se realiza en un examen médico, dado que en definitiva lo que se hace es evaluar la rigidez de los tejidos o la presencia de durezas anormales utilizando las manos, de manera no invasiva. Sin embargo, la elastografía puede acceder a localizaciones más profundas, no depende de un análisis subjetivo ni de la experiencia del operador.

Además, medir los parámetros mecánicos de los materiales biológicos también permite compararlos con valores normales, permitiendo así detectar anomalías en los tejidos (por ejemplo, un hígado cirrótico es más rígido que uno normal)