

Pierfrancesco Fusco
Gian Marco Petroni

CHE COS'È L'ECOGRAFIA

L'ecografia oggi rappresenta e deve rappresentare ciò che finora è stato il fonendoscopio per ogni medico; è diventata ormai uno strumento imprescindibile per ogni specialista ai fini sia diagnostici sia terapeutici, nell'ambiente intraospedaliero come nell'emergenza territoriale.

La conoscenza delle basi fisiche che portano alla formazione dell'immagine, le diverse modalità di acquisizione, così come gli artefatti, i limiti e i vantaggi, rappresentano il punto di partenza fondamentale che prelude all'utilizzo di questo prezioso strumento.

L'ecografia è una tecnica diagnostica non invasiva, accessibile e versatile, che utilizza gli ultrasuoni per ottenere immagini del corpo umano senza l'utilizzo di radiazioni ionizzanti, in tempo reale e, se necessario, direttamente al letto del paziente.

In particolare, alla base della formazione dell'immagine, vi è la capacità degli ultrasuoni di attraversare i diversi tessuti umani, ognuno con una caratteristica impedenza acustica, ed essere riflessi nuovamente verso la sorgente.

CHE COSA SONO GLI ULTRASUONI

Gli ultrasuoni sono onde meccaniche caratterizzate da bassa lunghezza d'onda e frequenza elevata che può variare da 2 a 20 MHz. La propagazione nella materia delle onde ultrasoniche avviene grazie a un moto ondulatorio ed è caratterizzata dai fenomeni di:

- *riflessione*: parte delle onde viene riflessa dal tessuto attraversato e torna alla sorgente, dove viene elaborata dal software con la conseguente formazione dell'immagine; in questo caso il fascio incidente risulta perpendicolare al tessuto;
- *rifrazione*: se l'incidenza del fascio è obliqua, l'eco ritorna dall'interfaccia a un angolo uguale a quello d'incidenza; il fascio trasmesso è deviato dalla linea retta proporzionalmente alla differenza nella velocità degli ultrasuoni in ciascun lato dell'interfaccia, fenomeno che è responsabile di alcuni artefatti;
- *diffusione o scattering*: è la diffusione in tutte le direzioni che il fascio ultrasonoro subisce quando incontra una superficie irregolare o tante piccole superfici orientate in modo diverso.

BASI DELLA FORMAZIONE DELL'IMMAGINE

Alla base della formazione dell'immagine c'è la diversa impedenza acustica dei vari tessuti (Tab. 1.1). Questi, quando attraversati dal fascio di ultrasuoni e conseguentemente ai fenomeni di rifrazione e riflessione, danno luogo alla formazione di echi di ritorno verso la sorgente.

È a livello della sorgente che gli echi di ritorno, ognuno con una frequenza e lunghezza d'onda determinate dalle caratteristiche del tessuto attraversato, colpiscono il trasduttore e vengono trasformati in impulsi elettrici che, rielaborati dal software, generano un'immagine in scala di grigi. A ogni pixel dell'immagine è assegnata una diversa luminosità, meglio definita come ecogenicità, proporzionale all'intensità degli echi riflessi. La scala di grigi così generata varia dall'*iperecogenicità* (bianco brillante) del tessuto osseo, all'*anecogenicità* dell'aria (che appare di colore nero).

Le interfacce oblique o tra tessuti a diversa velocità di propagazione degli ultrasuoni (rifrazione) sono responsabili degli artefatti.

GENESI DEGLI ULTRASUONI

Quanto descritto in precedenza avviene in gran parte all'interno della sonda ecografica. Essa contiene, infatti, dei cristalli piezoelettrici che hanno la peculiare capacità di vibrare e deformarsi quando sottoposti a tensione elettrica e di tornare repentinamente alla forma di partenza al termine dello stimolo. Questo repentino ritorno elastico fa sì che i cristalli entrino in risonanza, generando una piccola serie di vibrazioni che portano alla formazione degli ultrasuoni. Il fenomeno può avvenire in ambedue le direzioni.

È importante ricordare che i cristalli possono essere sollecitati con corrente elettrica continua o discontinua (alternata), con conseguente emissione continua o pulsata di ultrasuoni. Altra caratteristica

Tabella 1.1 Impedenza acustica dei diversi tessuti

| Materiali | Densità (g/cm ³) | Velocità (m/s) | Impedenza acustica (× 10 ⁶ rayl) |
|----------------|------------------------------|----------------|---|
| Aria (20 °C) | 0,0013 | 331 | 0,0004 |
| Acqua (20 °C) | 0,9987 | 1480 | 1,5 |
| Grasso | 0,92 | 1478 | 1,36 |
| Pelle | 1,09 | 1519 | 1,58 |
| Ossa | 1,8 | ~3500 | 6,3-7,8 |
| Sangue | 1,04 | 1566 | 1,63 |
| Vaso sanguigno | 1,08 | 1530 | 1,65 |

fondamentale è lo spessore dei cristalli piezoelettrici che determina la frequenza degli ultrasuoni emessi: in particolare, maggiore è lo spessore, minore è la frequenza e viceversa. Questo aspetto strutturale è la base delle differenze nell'acquisizione delle immagini nei diversi tipi di sonda ecografica.

SONDE

La sonda rappresenta la parte fondamentale dell'ecografo. Nella sonda la corrente elettrica alternata viene convertita in ultrasuoni e viceversa, per effetto piezoelettrico diretto e inverso. La geometria della sonda e la frequenza di trasmissione, legata al coefficiente elettroacustico della ceramica piezoelettrica, definiscono le proprietà fondamentali della sonda e l'uso nelle applicazioni cliniche (Fig. 1.1).

Sonda lineare

La sonda lineare è un trasduttore di forma rettangolare in cui le singole linee di scansione sono parallele ed emesse con direzione perpendicolare alla sonda stessa.

Utilizza frequenze variabili da 5 a 15 MHz e viene utilizzata per lo studio di strutture superficiali.

Sonda convex

La sonda convex è un trasduttore di forma trapezoidale i cui cristalli sono disposti lungo una superficie curva. Questa forma comporta la formazione di un'immagine con un campo profondo più ampio rispetto a quello delle sonde lineari. Realizza una scansione a ventaglio, uti-

lizza frequenze variabili da 2,5 a 5 MHz, adatte pertanto allo studio delle parti profonde, come l'addome.

Sonda settoriale (phased array)

Questa sonda è caratterizzata da una limitata superficie di contatto che permette di ovviare a ostacoli acustici come le coste. È costituita da microcristalli multipli affiancati che vengono attivati con piccolissimi ritardi l'uno dall'altro generando un fascio che può essere inclinato in varie direzioni (*steering*); la risultante area di scansione è di tipo conico.

È usata particolarmente in cardiologia.



Figura 1.1 Principali tipi di sonde ecografiche. In alto a sinistra: sonda convex; in alto a destra sonda lineare; in basso: sonda settoriale.

FREQUENZA

La frequenza è importante perché da essa dipende la risoluzione spaziale e quindi la qualità dell'immagine.

Incrementando la frequenza, però, si riduce progressivamente l'intensità del fascio con perdita della capacità di penetrazione in profondità; tale attenuazione, dovuta alle varie forme di riflessione e soprattutto all'assorbimento acustico, è legata con rapporto lineare alla frequenza impiegata.

Per questo motivo, per lo studio delle strutture superficiali occorre utilizzare sonde a più alta frequenza (7,5-13 MHz), mentre la valutazione di organi profondi richiede l'impiego di basse frequenze (3,5-5 MHz).

ACQUISIZIONE DELL'IMMAGINE

Ecografia B-mode (Brightness Mode)

Gli echi di ritorno appaiono sul monitor come punti, la cui luminosità o scala dei grigi è proporzionale all'ampiezza degli echi stessi e la cui posizione corrisponde alla profondità alla quale gli echi originano lungo una linea di scansione singola (che rappresenta l'asse del fascio) rispetto al trasduttore (Fig. 1.2).

Ecografia M-mode (Motion Mode)

Questo tipo di ecografia non è altro che un B-mode in cui, lungo una linea di



Figura 1.2 Esempio di acquisizione in B-mode a livello epatico.

scansione fissa, si hanno continui refresh della posizione dei vari echi i quali, però, non vanno a sovrapporsi ai precedenti come avviene nel B-mode real time, ma si affiancano in successione l'uno all'altro, dando così informazioni sulla mobilità della parte indagata lungo quella singola linea di scansione nel tempo.

Per comprendere da quale linea di scansione si sta ottenendo la sequenza, è possibile visualizzare contemporaneamente la stessa immagine in B-mode real time, nella quale si individua una linea tratteggiata che rappresenta la linea di scansione in M-mode.

Color flow Doppler

È la modalità di acquisizione dell'immagine ecografica utilizzata per lo studio del flusso sanguigno.

L'*effetto Doppler* è un fenomeno fisico che consiste nel cambiamento apparente, rispetto al valore originario, della frequenza o della lunghezza d'onda percepita da un osservatore raggiunto da un'onda emessa da una sorgente che si trovi in movimento rispetto all'osservatore stesso. Nel caso dell'ecografia, l'osservatore è rappresentato dalla sonda, mentre la sorgente in movimento è rappresentata dai globuli rossi che si muovono all'interno dei vasi sanguigni.

Il software, che conosce la differenza tra la frequenza emessa dalla sorgente e quella dell'onda riflessa recepita dalla sonda, può calcolare la velocità e la direzione del mezzo su cui l'onda si è riflessa, mentre la profondità è nota dal tempo impiegato per il ritorno.

Nello studio del flusso ematico, a seconda della direzione del flusso rispetto alla

sonda, viene assegnata una codifica a colori: rosso per il flusso in avvicinamento, blu per il flusso in allontanamento.

Power Doppler

Si tratta di una modalità di acquisizione dell'immagine che si basa su un concetto simile a quello del color Doppler ma prende in considerazione l'energia della frequenza Doppler, piuttosto che le variazioni assolute. In questo modo si ha un segnale più sensibile rispetto al color Doppler, utile nell'analisi diagnostica di vasi piccoli e profondi nonostante si perda la possibilità di distinguere la direzione del movimento del sangue. Tale metodica trova massima applicazione nell'anestesia locoregionale, in cui è fondamentale discriminare i piccoli vasi con le strutture nervose, evitando così l'iniezione di anestetico locale intravascolare.

REGOLAZIONE DELLE IMPOSTAZIONI

La regolazione dei comandi dell'ecografo consente all'operatore di ottimizzare l'immagine acquisita; al contrario, un errato setting di tali parametri può compromettere la diagnosi (Fig. 1.3).

Visualizzazione armonica

La visualizzazione armonica rappresenta una tecnica utilizzata per ridurre il rumore o la distorsione di un'immagine ecografica, diminuendo gli effetti di aberrazione di fase. Molti ecografi possono applicare questa modalità visiva, che a volte può rivelarsi molto utile.

Guadagno

Il regolatore generale del guadagno influenza l'amplificazione degli echi di ritorno ed è direttamente responsabile della luminosità globale dell'immagine. Tutti gli ecografi hanno un regolatore del guadagno che provoca un'amplificazione uniforme di tutti gli echi di ritorno, indipendentemente dalla profondità della loro origine.

Il TGC (guadagno dipendente dalla profondità), regolatore della compensazione del guadagno in funzione del tempo o della distanza, si utilizza per produrre un'immagine dalla luminosità equilibrata, dal campo superficiale a

quello profondo. Gli echi che ritornano dalle strutture più profonde sono più deboli di quelli che originano dalle strutture superficiali, a causa dell'attenuazione dell'intensità del suono. Variando tale parametro, è possibile modificare il guadagno a diverse profondità (si veda Fig. 1.3).

Interpretazione dell'immagine

Ecogenicità

L'ecogenicità esprime una valutazione quantitativa degli echi o delle riflessioni che si generano quando un tessuto



Figura 1.3 Postazione dei comandi.

B/M: B-mode; CFM: color Doppler; M: M-mode; PW: Doppler pulsato.

è colpito dagli ultrasuoni. In relazione alle caratteristiche strutturali dei diversi tessuti e all'intensità degli echi riflessi, l'immagine che si formerà sul monitor sarà più o meno luminosa. In base a ciò si possono individuare:

- *strutture iperecogene*, che generano echi in grande quantità e/o intensità; sono strutture in cui le interfacce presenti riflettono più o meno intensamente gli echi, come per esempio l'osso o un calcolo o, meno, una fascia o un setto fibroso;
- *strutture ipoecogene*, che generano pochi echi e/o di bassa intensità; sono strutture in cui l'assenza di echi è solo parziale e di entità variabile, sono a contenuto prevalentemente liquido, ma nel quale la presenza di elementi ecoriflettenti in sospensione rompe parzialmente l'uniformità; la rappresentazione sarà di intensità variabile nella scala dei grigi;
- *strutture anecogene*, che non generano echi perché non ci sono interfacce al loro interno, tipico dei liquidi; gli ultrasuoni non vengono né deviati né riflessi; nella scala dei grigi vengono registrate con il nero.

Artefatti ecografici

Gli artefatti di maggiore utilità per la diagnosi sono sicuramente quelli descritti qui di seguito.

- *Cono d'ombra posteriore*: viene a crearsi quando il fascio di ultrasuoni incontra una struttura in grado di rifletterli o di attenuarli completamente, tanto da eliminare gli echi di ritorno della zona sottostante, che è quindi muta. È il caso di aria o gas e di ossa, calcoli, calcificazioni.

- *Rinforzo di parete posteriore*: quando gli ultrasuoni attraversano una struttura a contenuto liquido, e quindi raggiungono la parete opposta dove vengono riflessi, mantengono la stessa intensità che hanno all'ingresso e quindi forniscono un'immagine più intensamente ecogena delle zone circostanti, che si trovano alla stessa profondità, ma sono colpite da ultrasuoni di intensità minore, perché a monte hanno già subito dispersione.
- *Ombre acustiche laterali*: artefatto legato al fenomeno della rifrazione degli ultrasuoni. Quando attraversa un'interfaccia, l'ultrasuono devia dalla sua direzione rettilinea con un angolo che presenterà una deflessione verso il versante a impedenza maggiore. Risulta evidente quando gli ultrasuoni incontrano i profili laterali di strutture rotondeggianti od ovalari, determinando la comparsa delle "ombre acustiche laterali".
- *Riverberazione*: si genera quando gli ultrasuoni incontrano perpendicolarmente strutture a forte riflessione, dalle quali vengono in parte nuovamente riflessi verso il trasduttore che li riflette ancora verso di esse, fino a esaurimento degli stessi. Come sempre, l'ecografo traduce il tempo in spazio e quindi si evidenziano nell'immagine una serie di righe ecogene parallele che indicano bolle di gas o strutture contenenti calcio. Anche in questo caso è l'esperienza a guidare l'interpretazione e quindi l'importanza da dare a quanto osservato, ai fini della diagnostica.
- *Effetto pioggia*: non necessita praticamente mai di segnalazione nel referto,

in quanto è un artefatto da riverberazione diffusa dai tessuti posti prima di una formazione a contenuto liquido, come la vescica piena, e che la riduzione del guadagno dell'apparecchio fa scomparire.

- **Coda di cometa:** compare quando vi è una marcata differenza acustica tra una struttura e i suoi dintorni. La riflessione del raggio crea un fenomeno di risonanza. Il lasso di tempo tra echi successivi viene interpretato come distanza, generando una serie di pseudo-interfacce molto vicine tra loro. Ogni riflessione del raggio viene visualizzata sullo schermo dietro il riflesso precedente. Il riscontro di questo artefatto sta assumendo una grande importanza nello studio del torace in quanto può essere indicativo di edema interstiziale.
- **Immagini a specchio (mirror artifacts):** fenomeno che si verifica quando si prendono in considerazione strutture curvilinee a forte riflessione, come per esempio il diaframma. Questo artefatto è rappresentato dalla duplicazione dell'immagine specularmente rispetto alla superficie riflettente e si produce a causa di riflessioni multiple, che avvengono tra la superficie che agisce da specchio e la struttura posta a ridosso di essa. Può essere il caso di una raccolta liquida sovradiaframmatica che risulta specularmente rappresentata al di sotto del diaframma. Questo artefatto è particolarmente insidioso perché può indurre in gravi errori diagnostici (false ernie diaframmatiche, false raccolte liquide ecc.). È sempre opportuno ricordare che

un'immagine "reale" sarà visibile in tutte le scansioni, mentre un artefatto da specchio no.

Gli artefatti spesso guidano l'ecografista esperto verso la diagnosi. È dovere del medico discriminare ciò che è vero da ciò che potrebbe esserlo o addirittura da ciò che è falso.

Ribadendo un concetto fondamentale, in linea generale, si segue la regola secondo cui è vero tutto ciò che è presente e che si ripete nelle immagini ottenute con scansioni diverse, mentre può essere un artefatto quello che non si ripropone in tutte le immagini ottenute.

ESECUZIONE DELL'ESAME

Scelta della sonda

Il principio base nella scelta della sonda è quello di utilizzare la frequenza più alta che consenta una penetrazione adeguata alla profondità desiderata; ciò si ottiene non soltanto scegliendo un trasduttore specifico, ma anche utilizzando adeguatamente il suo range di frequenze.

La scelta della sonda avviene tenendo conto del distretto anatomico da studiare e delle caratteristiche fisiche del paziente. Bisogna tenere sempre a mente che la capacità degli ultrasuoni di penetrare nei tessuti è strettamente dipendente dalla frequenza delle radiazioni. Così per i tessuti superficiali si utilizzeranno frequenze più elevate che consentono di ottenere immagini con una maggiore risoluzione spaziale, mentre per lo studio degli organi splanchnici si prediligeranno sonde ecografiche a bassa frequenza che permettono di studiare le strutture più profonde, a scapito però della qualità.

Preparazione della sonda

Durante l'esecuzione dell'esame ecografico, in aggiunta alle ordinarie condizioni igieniche, risulta fondamentale la disinfezione dello strumento entrato in contatto con il paziente al fine di evitare la diffusione di agenti patogeni.

Il gold standard è rappresentato dall'utilizzo di coprisonda monouso, facilmente reperibili in commercio a costi modici. In questo caso occorre avere l'accortezza di apporre una sufficiente quantità di gel sulla sonda prima di coprire il device, prestando attenzione a eliminare tutta l'aria intrappolata al fine di evitare la formazione di artefatti.

Modalità di acquisizione delle immagini

Orientamento spaziale della sonda

Prima di iniziare qualsiasi esame ecografico, l'operatore dovrà cercare sulla testa della sonda un piccolo repere in rilievo, oppure un piccolo led, che corrisponde al lato sinistro dell'immagine sullo schermo. L'acquisizione delle immagini è codificata a livello internazionale, così che chiunque si trovi ad analizzare un esame ecografico conoscerà con certezza l'orientamento spaziale della sonda rispetto al paziente.

Il marker viene sempre posizionato:

- nelle scansioni trasversali, verso la destra del paziente;
- nelle scansioni longitudinali, verso la testa del paziente.

Modalità di scansione

Ogni volta che si esegue un esame ecografico è fondamentale eseguire almeno

due scansioni su piani ortogonali: naturalmente sono possibili tutte le scansioni intermedie necessarie a studiare la struttura indagata in modo esaustivo.

Le scansioni fondamentali sono:

- *scansione trasversa*: la sonda viene orientata in modo che il lato destro del paziente sia rappresentato alla sinistra dello schermo ecografico, come se il paziente venisse osservato dalla parte dei piedi;
- *scansione longitudinale*: la sonda viene orientata in modo che l'estremità craniale del paziente sia rappresentata sulla sinistra dello schermo ecografico, come se il paziente venisse osservato dal suo lato destro.

VANTAGGI E SVANTAGGI DELL' ECOGRAFIA

Vantaggi

1. Basso costo: il costo di un'ecografia rispetto a una TC o una RM è irrisorio.
2. Rapidità di esecuzione.
3. Innocuità (non si utilizzano radiazioni ionizzanti).
4. Ripetibilità.
5. Possibilità di studiare fenomeni dinamici come i flussi sanguigni.
6. Interpretazione in tempo reale dell'esame.

Svantaggi

1. Perizia dell'operatore: è una procedura operatore-dipendente che richiede competenza ed esperienza.
2. Dipendenza da meteorismo intestinale, struttura del paziente (per es. tessuto adiposo in eccesso), strutture ossee.

LETTURE CONSIGLIATE

- Aldrich JE. Basic physics of ultrasound imaging. *Crit Care Med*. 2007; 35(5):S131-7.
- Borowy CS, Mukhdomi T. Sonography physical principles and instrumentation. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK567710/>
- Fulgham PF. Physical principles of ultrasound. In: Fulgham PF, Gilbert BR (eds). *Practical urological ultrasound*. Springer, Cham; 2021.
- Grogan SP, Mount CA. Ultrasound physics and instrumentation. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK570593/>
- Sites BD, Brull R, Chan VW et al. Artifacts and pitfall errors associated with ultrasound-guided regional anesthesia. Part I: understanding the basic principles of ultrasound physics and machine operations. *Reg Anesth Pain Med*. 2007;32(5):412-8.