

Diagnóstico y Terapéutica (DyT) por Imágenes

Principios de Ecografía Doppler

César Torres

Profesor Adjunto de la Cátedra de Diagnóstico y Terapéutica por Imágenes
Facultad de Ciencias Médicas. Universidad Nacional de La Plata

RESEÑA HISTORICA

Johann Cristian Doppler (1805-1853) , nació en Salzburgo , realizó sus estudios en Viena , y trabajo en Munich y Praga . A partir de 1841 fue nombrado Profesor de Ciencias Elementales y Geometría en la Universidad Técnica de Praga .

El 25 de Mayo de 1842 en la sesión de Ciencias Naturales de la Real Sociedad Bohemia de las Ciencias, Doppler pronunció su famosa conferencia sobre la luz cromática de las estrellas dobles, y algunas otras estrellas del firmamento. En ella se refirió a la teoría de que el color de la luz depende de su frecuencia. A continuación afirmó que su frecuencia aumenta a medida que el observador se acerca a la fuente sonora y disminuye a medida que se aleja de esta.

Doppler utilizó el mismo principio para explicar que las estrellas de color azul se desplazaban forzosamente hacia al observador, mientras que las de color rojo lo hacían en dirección contraria .Estos conceptos en parte equivocados, parten de la suposición de que todas las estrellas emiten luz de la misma frecuencia: color blanco. Hoy sabemos que las estrellas emiten luz de diferente color (amarillo, azul o rojo), acorde a su edad o estadio evolutivo, por lo cual las afirmaciones de Doppler que, más tarde se aplicarían correctamente al sonido, no podían explicarse con el ejemplo de las estrellas.

Fue el Holandés Buys-Ballot, quien aplicó el postulado de Doppler al sonido. Había notado que al esperar el tren en la estación, el silbato de la locomotora, se percibía con distinta tonalidad acorde a la distancia locomotora-estación.

En el verano del año 1845 realizo un experimento en terreno para corroborar su teoría : coloco dos músicos con instrumentos de viento (trompeta , clarinete) , sobre un tren que se desplazaba 1000 metros hacia un lado y otro con respecto a observadores fijos en el centro del recorrido y que registraban , según su oído , las notas que percibían (en la época no se contaba con instrumentos de medición para registro de frecuencias) . Repitió el experimento, con distintas velocidades de la locomotora y luego con músicos fijos y observadores moviéndose en el tren.

Las conclusiones fueron claras: había una variación de frecuencia en el sonido emitido por un objeto en movimiento. La magnitud de la variación dependía fundamentalmente de la velocidad de la locomotora, mientras que el tipo de variación (aumento o disminución de la frecuencia) de la dirección de la misma.

Muchos años pasaron antes que los postulados de Doppler y experimentos de Buys-Ballot alcanzaran utilidad práctica, hasta que en nuestros días forman parte elemental de un método que ha alcanzado avances espectaculares.

FUNDAMENTOS FISICOS

Lo que fue probado experimentalmente, se refleja en la Ecuación Doppler (Esq.1).

$$F_d = F_r - F_t = \frac{2 \cdot F_t \cdot V_0 \cdot \cos O}{C}$$

F_d: frec.cambio Doppler.

F_t: frec.transductor.

F_r: frec.recibida.

V₀: Vel.objeto en movimiento.

O: Ang.haz emitido y direccion de Flujo.

C: vel. del sonido.

Esq.1

En la misma es fácil comprender, que si somos capaces de medir el cambio de frecuencia: es decir la diferencia entre la frecuencia emitida y la recibida, podremos conocer la velocidad del objeto en movimiento sobre el cual incidimos, dado que los demás elementos de la fórmula principal son conocidos.

Aunque nos parezca demasiado difícil la comprensión, conocemos al efecto Doppler cuando violamos las normas de tránsito, dado que la Policía Caminera obtiene nuestra velocidad mediante el mismo.

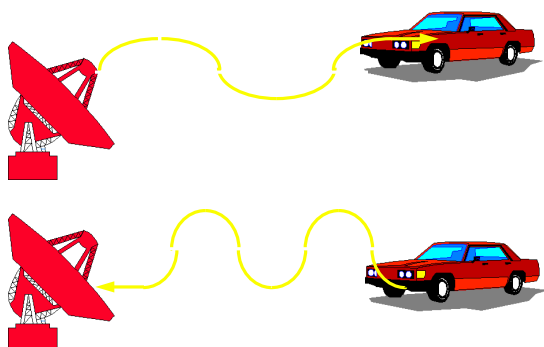


Fig. .1

ct98

Imaginemos que el auto de la Fig. 1 viaja hacia nosotros a una velocidad determinada. Si incidimos sobre el mismo con una onda de sonido con frecuencia conocida, debemos imaginar que la misma es un resorte. El impacto onda-auto hace que esta se “arrugue”, es decir disminuye su longitud de onda, por lo cual en el mismo intervalo de tiempo entran mayor cantidad de ciclos. Como resultado la frecuencia inicial aumenta cuando vuelve hacia nosotros para ser medida, por lo que el sonido tiene un tono más agudo. La magnitud de la variación de la frecuencia dependerá entonces de la velocidad del objeto en movimiento.

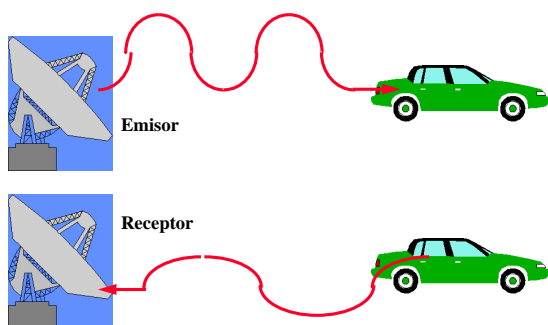


Fig.2

ct98

Por el contrario si el auto se aleja (Fig. 2), ejerce un efecto “arrastre” sobre la onda, es como si la estirara. Al aumentar la longitud de onda la frecuencia disminuye, dado que entrarían menor cantidad de ciclos en el mismo intervalo de tiempo. Como resultado, el sonido que registramos va a tener un tono mas grave con respecto al emitido. La magnitud de la variación nuevamente dependerá de la velocidad del objeto, pero como vemos el tono con que retorna (más agudo o más grave) depende de su dirección.

Con la medición doppler efectuada podemos conocer entonces, la velocidad del objeto en movimiento y si éste se acerca o aleja con respecto a nosotros.

En pocos instantes trataremos de aplicar ésta aparente clase de Educación vial, al uso médico que nos interesa.

Para ello debemos considerar que la antena receptora emisora, es el transductor o sonda que maneja el operador doppler, mientras que nuestros autos o vehículos son los glóbulos rojos. Si somos capaces de medir la velocidad de los glóbulos rojos, principal elemento sólido de la sangre, conoceremos entonces la velocidad circulatoria y dirección del torrente sanguíneo en un determinado vaso.

La medición, se hace entonces mediante la localización del vaso con la imagen ecográfica en tiempo real que nos permite colocar un cursor (gate) en el centro del mismo con un ángulo de incidencia determinado (ángulo de insonación) (Fig. 3). La medición de la velocidad se ve sensiblemente afectada por el ángulo de incidencia que debe situarse entre 30-60 grados, para lograr valores confiables. Los modernos equipos permiten corregir dentro de ciertos márgenes los defectos en los ángulos para acercarse a los valores ideales.

La manera de coleccionar y representar los datos varía de acuerdo al método doppler utilizado.

En el doppler continuo, como su nombre lo indica, los cristales continua y simultáneamente envían y reciben datos. La gran cantidad de datos coleccionados lo hacen muy sensible para la obtención del espectro doppler, pero le es difícil determinar con precisión la localización del flujo medurado.

El doppler pulsado, manda pulsos intermitentemente, coleccionando los datos en los intervalos entre los mismos, lo que le permite una adecuada localización del flujo, gracias al cálculo del tiempo que necesita la onda para ir y volver de un punto determinado.

Sin duda la aparición del doppler duplex, es decir la posibilidad de tener la imagen en tiempo real y el registro pulsado al mismo tiempo y luego del modo triplex adosando el mapeo color, aleja la problemática de la localización del flujo.

En el modo continuo y pulsado la velocidad del flujo es representado mediante una onda que tiene en el eje “Y” la velocidad en metros o centímetros por segundo y en el “X” al tiempo.

Para llegar a este trazado hubo un paso intermedio donde la información con que contábamos era por un lado, el cambio de frecuencia doppler, y la cantidad de glóbulos rojos, que viajaban a la misma velocidad y provocaban ese cambio por el otro. La transformación de Fourier nos permite acceder a

la velocidad de los glóbulos rojos y su concentración es representada en el espesor del trazado de la onda.

En el caso de un registro arterial (Fig. 4), aparecen las variaciones en la velocidad durante el ciclo cardíaco. La velocidad es mayor en la sístole y menor en la diástole como se desprende del registro.

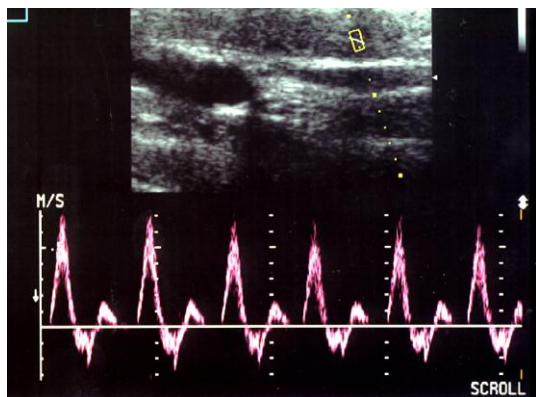


Fig.4

El flujo venoso presenta una fascicidad típica que acompaña los movimientos respiratorios, pero que se distingue fácilmente de la pulsatilidad arterial. (fig. 5)

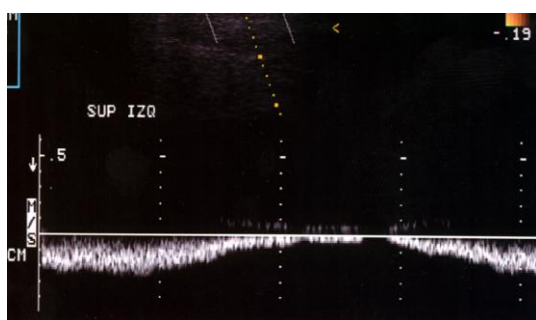


Fig.5

Además del registro que nos muestra el monitor, escuchamos el sonido típico de los flujos arterial y venoso, mediante parlantes adecuadamente dispuestos en los equipos. El sonido del vaso en estudio es de gran ayuda para el operador experimentado, tanto en condiciones normales como patológicas.

Por convención el flujo que se acerca al transductor es representado por encima de la línea basal y el que se aleja por debajo. No obstante es un parámetro modificable mediante una sencilla operación del software.

La introducción del doppler color revolucionó el método y amplió el espectro de sus posibilidades. A la imagen ecográfica en tiempo real del vaso, se le superpone la representación del flujo del mismo con una escala color. En ella se representa por convención al flujo que se acerca al transductor en color rojo y el que se aleja en color azul. Acorde a la escala utilizada, las distintas tonalidades distinguen las velocidades medidas. Por ejemplo: en la escala velocidad saturación el color va del rojo al blanco con múltiples tonalidades rosa intermedias y del azul al blanco con un degradé de celestes. El blanco representa la saturación máxima o lo que es lo mismo las velocidades más elevadas. Otras escalas representan las velocidades máximas en color amarillo en la del rojo y en verde en la del azul. (Fig. 6)

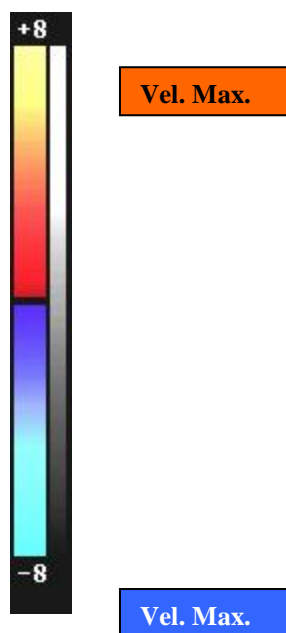


Fig.6

Finalmente el doppler de poder, grafica en escala color los datos obtenidos antes de la transformación de Fourier: de ésta manera la representación obtenida es la concentración de los glóbulos rojos y no su velocidad, por lo que constituye una verdadera angioecografía.

El doppler de poder (power doppler) no se ve

Influido por el ángulo de insonación, como el doppler pulsado y color, es mucho más sensible que sus predecesores, aunque no grafica la dirección de flujo. Los equipos modernos tienen gran sensibilidad de manera que es posible ver vasos de muy pequeño calibre. (Fig. 7)



Fig.7a.

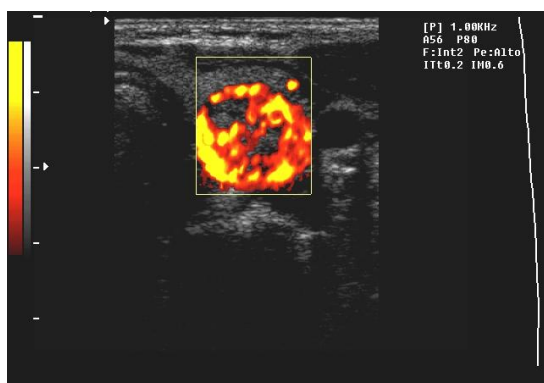


Fig.7a. Muestra la bifurcación carotídea valorada con el doppler de poder; Fig. 7b la vascularización de un nódulo sólido tiroideo, demuestra la sensibilidad del mismo para pequeños vasos.

Hemodinamia del flujo arterial normal y patológico

La sangre es una suspensión, donde los glóbulos rojos son las partículas más numerosas. Viajan en los vasos sanguíneos dispuestos de manera particular constituyendo lo que se denomina flujo laminar. En él, las partículas centrales son las que viajan a una velocidad mayor, mientras a medida que nos acercamos a la pared, los valores disminuyen hasta hacerse casi cero, es por eso que “la onda del flujo” suele representarse en forma parabólica. (Fig.8)

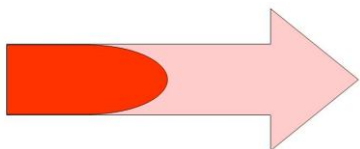


Fig.8.Representación esquemática del flujo laminar.

La flecha marca la dirección del flujo, los glóbulos rojos marchan ordenados en forma de parábola.

Estas afirmaciones ciertas para un vaso recto, tienen algunas variantes en las curvas, donde se produce una pérdida del flujo laminar y los glóbulos rojos que viajan a mayor velocidad se disponen en la parte externa. (Fig.9)

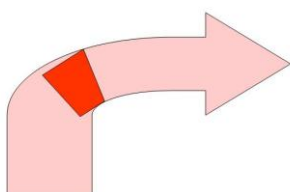


Fig.9.Representación esquemática del flujo no laminar.

La flecha marca la dirección del flujo, los glóbulos rojos en el sector externo de la curva marchan a mayor velocidad que en el interno.

Esta pérdida del flujo laminar en las curvas se puede dar también en vasos de trayecto tortuoso, zonas de bifurcación e incluso en el inicio de ramos principales de un vaso. Estas zonas presentan flujo turbulento y en zonas de flujo reverso sectorial como ocurre en la bifurcación carotídea. Estos fenómenos hemodinámicos locales son responsables de la mayor frecuencia de lesiones ateroscleróticas en estas regiones.

La representación espectral (PW) del flujo laminar muestra una onda “trazada a lápiz” donde el escaso grosor de la onda depende de que la mayoría de los glóbulos rojos, viajan en forma ordenada y a una misma velocidad. Por debajo de la onda aparece la ventana espectral libre de trazado. (Fig.10)

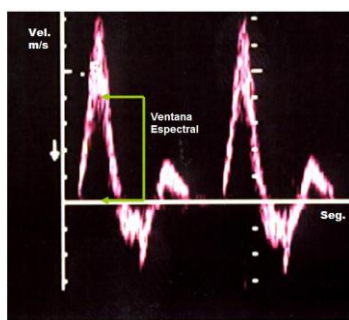


Fig.10. Es de notar que la onda normal es de trazado fino y deja entre sí y la línea de base la ventana espectral.

Para explicar los fenómenos que ocurren en una estenosis, imaginemos que los espectadores de una tribuna de gran tamaño tienen que salir por una puerta pequeña en proporción al tamaño de la misma. Para poder salir las personas que vienen a una velocidad dada al llegar al “embudo” se empujan unos a otros de manera que se desvían parcialmente de su trayecto, se desordenan y pasan a distinta velocidad incluso algunos tienen que retroceder parcialmente. (Fig.11)

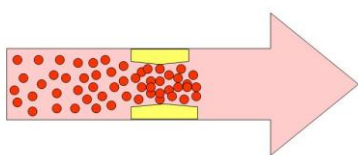


Fig.11. Vemos a los eritrocitos aglomerarse, chocar entre sí
Y viajar a distintas velocidades para saltar la estenosis no significativa.

Esto es lo que les ocurre a los eritrocitos en una estenosis inicial, y es por eso que en las estenosis hemodinámicamente no significativas a partir del 40-50% este desorden se traduce en el espectro como un trazado de la onda de mayor grosor al normal y por lo tanto un estrechamiento de la ventana espectral (los eritrocitos se desordenan y viajan a distintas velocidades). El modo color muestra la turbulencia como un mosaico de colores, que varía de acuerdo a la escala elegida. (Fig.12)

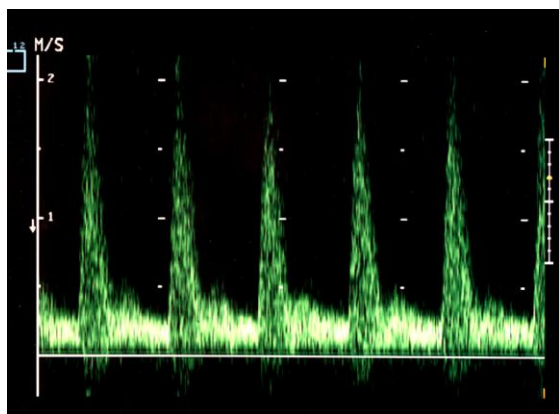


Fig.12. la ventana espectral se ensucia, demostrando las distintas velocidades de los eritrocitos en su paso por la estenosis. Esta es la traducción de la turbulencia en el doppler espectral.

Si la puerta de salida es mas estrecha aún los espectadores próximos a ella, tienden a pasar corriendo debido a la presión que ejercen los espectadores que vienen detrás. (Fig.13)

En las estenosis hemodinámica mente significativas (por encima del 60-70%) se produce un incremento de la velocidad a nivel de la misma, porque los eritrocitos que vienen con una determinada presión deben pasar por una sección del vaso menor. Cabe destacar que este fenómeno (yet) se produce a veces en un sector milimétrico en la boca de la estenosis por lo que debe examinarse meticulosamente el área afectada con la ayuda de la imagen en tiempo real y el modo color.

De acuerdo al territorio vascular explorado se han tabulado las velocidades normales y cuantificando los grados de estenosis en relación al incremento en las mismas. (Fig.14)

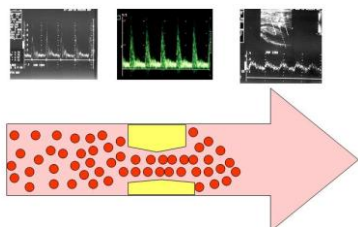


Fig.13. Arriba vemos a los eritrocitos pasar a gran velocidad la estenosis para luego decaer bruscamente en velocidad, incluso con cierto grado de flujo retrógrado.

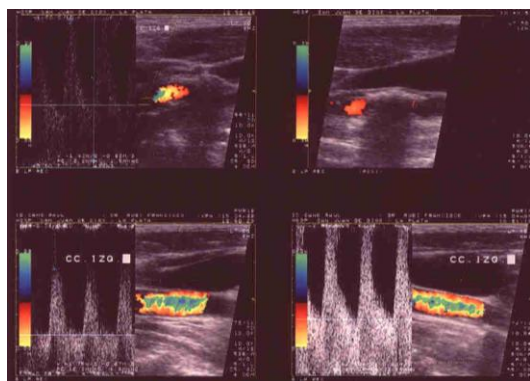


Fig.14. Se observa un notorio incremento de la velocidad en la boca de la estenosis asociado a flujo turbulento que se traduce por estrechamiento de la ventana espectral y mosaico de colores.

Las estenosis del 100% se diagnostican por la ausencia de flujo en los modos pulsado y color.

PATRONES DE FLUJO ARTERIAL Y VENOSO

El flujo arterial muestra un patrón espectral y audible pulsátil, transducción de ambas fases del ciclo cardíaco.

Entre los patrones normales en las arterias de la economía debemos distinguir por un lado las arterias periféricas como por ejemplo las del miembro inferior que tienen un flujo trifásico: flujo positivo durante la sístole; componente negativo durante el final de la sístole y un retorno por encima de la línea de base durante la diástole.

(Fig. 15)

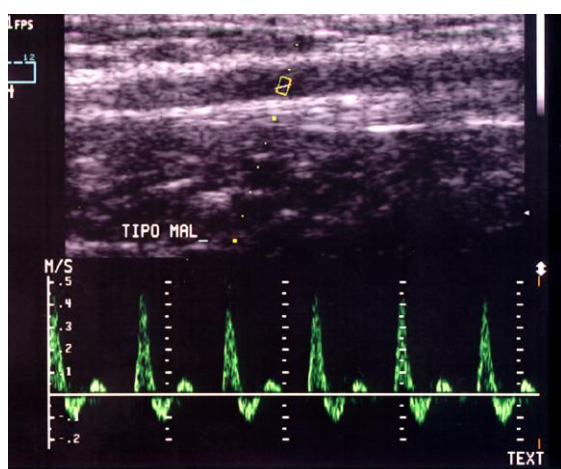


Fig.15. Flujo trifásico en la arteria tibial posterior en la región retromaleolar.

Este patrón es la traducción espectral de un flujo de alta resistencia (pobre diástole) en relación a los innumerables ramos musculares de las mismas.

Algo muy distinto ocurre en los vasos del cuello dado que las estructuras subsidiarias deben ser irrigadas durante ambas fases del ciclo cardíaco, el espectro muestra un flujo anterógrado durante ambas fases del mismo (por encima de la línea de base o rojo en el modo color). El flujo es denominado por algunos monofásico a pesar de distinguirse claramente la sístole/diástole.

El flujo es de baja resistencia (alta diástole), en el circuito de la carótida interna, vital para asegurar un flujo adecuado intracraneal y que carece además de ramos extracraneales. (Fig.16)

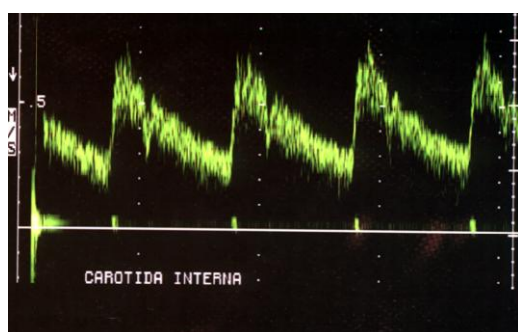


Fig.16. Flujo anterógrado de baja resistencia (alta diástole) como se ve en la carótida interna

Las arterias viscerales como la hepática, esplénica, mesentérica y renal presentan también flujo anterógrado.

El flujo venoso se encuentra por debajo de la línea de base (color azul), y se dibuja como una suave onda que presenta fascicidad respiratoria acorde al ciclo. Puede verse y es normal una breve excursión sobre la línea de base en forma de “V” invertida durante el ciclo respiratorio o las maniobras de inspiración profunda o Valsalva (maniobras de provocación), en relación al cierre normal valvular.(fig17)

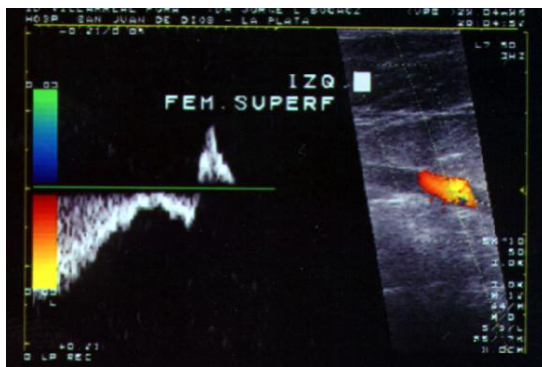


Fig.17. Cierre de la válvula venosa

El sonido venoso remeda al viento, a la tormenta como definían algunos autores ya en la época del doppler audible.

Una variante del flujo venoso es la que se da en las venas suprahepáticas, con un flujo que muestra tres fases en relación a las fases de contracción/ relajación auricular derecha. (Fig.18)

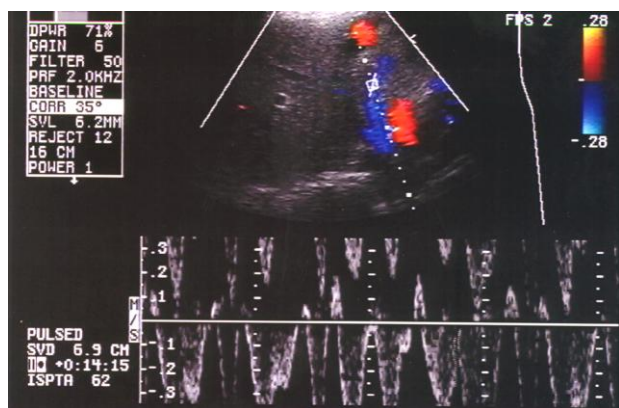


Fig.18. Flujo normal en las venas suprahepáticas.