

## ECOCARDIOGRAFIA DOPPLER: PRINCÍPIOS FÍSICOS, METODOLOGIA E APLICAÇÕES

MARCIO CAMPOS DE SÃO JOSÉ, MARIO OSWALDO VRANDECIC PEREDO, BAYARD GONTIJO FILHO, FERNANDO ANTONIO FANTINI, MARCO ANTONIO SALUM.

A associação da ecocardiografia bidimensional Doppler pulsado, permite o estudo não-invasivo mediante ultra-sons, do fluxo sanguíneo em diferentes pontos do coração e das grandes artérias, trazendo novo subsídio para o diagnóstico e avaliação não-invasiva das cardiopatias, sejam congênicas ou adquiridas.

### Considerações Gerais

Entende-se por efeito Doppler a variação de frequência entre a emissão e a recepção de uma série de ondas, observada quando a fonte emissora e/ou a fonte receptora se locomovem, aproximando-se ou afastando-se. Este fenômeno foi descrito em 1842 pelo físico Christian Doppler, e é observado tanto na propagação de energia mecânica, como os sons e ultra-sons, como, também, em emissões eletromagnéticas; sua observação nas emissões dos corpos celestes deu à teoria de expansão do universo, base da moderna astronomia<sup>1</sup>. O efeito Doppler também é observado nas ondas refletidas por um objeto que se aproxima ou se afasta da fonte emissora.

Observando-se um feixe de ondas sonoras, emitidas com uma frequência  $F$ , que viajam até refletir-se em um objeto estacionário situado a uma distância determinada e retorna à fonte emissora, nota-se que a frequência recebida,  $F'$ , é exatamente igual à frequência com que foram emitidas,  $F$ , já que a distância percorrida e a velocidade desenvolvida são as mesmas; portanto não haverá efeito Doppler ( $F = F'$ ; fig. 1A). Isto equivale, em ecocardiografia Doppler, à emissão do feixe de ultra-sons perpendicular à direção do fluxo sanguíneo. Se o objeto refletor se locomove em direção à fonte emissora, a segunda onda o encontrará mais próximo do que a primeira, sendo então a distância percorrida pela segunda onda menor do que a percorrida pela primeira. O intervalo de tempo que separa a chegada das duas ondas será menor do que o intervalo que separou sua emissão, havendo então um aumento na frequência de recepção ( $F < F'$ , fig. 1B). Quando o objeto refletor se afasta do

emissor, ocorre exatamente o contrário, havendo diminuição da frequência de recepção ( $F > F'$ , fig. 1C).

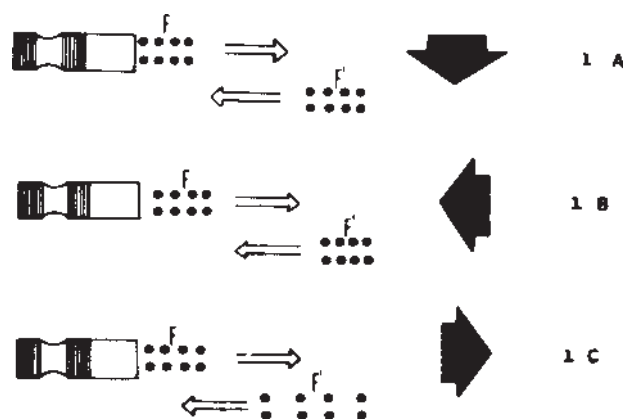


Fig. 1—Esquema básico do efeito Doppler. A) O ultra-som emitido com frequência  $F$  encontra um fluxo com direção perpendicular em relação à direção da emissão, não modificando a frequência  $F'$ , ao refletir-se; B) O ultra-som emitido com frequência  $F$  encontra o fluxo sanguíneo com direção contrária. A frequência  $F$  de emissão modifica-se, aumentando a frequência  $F'$  de recepção; C) O ultra-som emitido com frequência  $F$  encontra o fluxo sanguíneo afastando-se do ponto de observação. Há então, diminuição da frequência  $F'$  de recepção.

Conhecendo-se a diferença entre os intervalos de tempo  $T$  e  $T'$  ou entre seus respectivos inversos, isto é, as frequências de emissão e de recepção ( $F$  e  $F'$ ), pode-se calcular a velocidade e o sentido do movimento do corpo refletor com relação à fonte emissora. Como se conhece apenas o componente vetorial da velocidade do objeto refletor com relação ao emissor, calcula-se a velocidade real pelo produto da velocidade vetorial pelo cosseno do ângulo formado entre a direção do movimento do objeto refletor e uma reta entre este e a fonte emissora.

Nos sistemas de ultra-som Doppler empregados em medicina, os objetos refletores são os elementos figurados do sangue, particularmente as hemácias. A diferença entre a frequência de emissão e de recepção denomina-se “efeito ou desvio Doppler”. Como esta diferença produz uma frequência situada dentro do

espectro audível, pode ser amplificada, gerando um sinal sonoro de grande ajuda na realização do exame.

O estudo não-invasivo da velocidade dos elementos figurados que atravessam um feixe de ultra-som emitido de forma contínua, proporciona valiosas informações com relação ao fluxo no interior dos vasos sanguíneos. Porém, quando se estuda um determinado ponto das câmaras cardíacas, por exemplo, o orifício da valva mitral, os efeitos Doppler obtidos correspondem à velocidade de todas as hemácias que atravessam o feixe de ultra-som, isto é, à soma das velocidades dos objetos refletores que cruzam o orifício mitral, a via de saída do ventrículo esquerdo, a via de saída do ventrículo direito, etc. Deste modo, obtêm-se curvas complexas e às vezes de difícil interpretação. Para evitar este inconveniente, idealizou-se um sistema pelo qual a emissão de ultra-sons é pulsada, como nas técnicas ecocardiográficas convencionais.

A análise das ondas refletidas em determinado tempo, depois de serem emitidas, permite o estudo de um determinado ponto do feixe<sup>2</sup>. Este sistema denominado Doppler de onda pulsada (DOP) permite obter informações sobre o fluxo em um ponto determinado das câmaras cardíacas ou dos vasos, denominado "volume-amostra", o que é localizado através da ecocardiografia bidimensional. Como só recentemente foi possível a reprodução da imagem bidimensional em movimento, o registro da região do coração estudada com efeito Doppler é realizada em modo-M na grande maioria dos aparelhos, representando-se a localização do "volume-amostra" por meio de uma linha cuja orientação é de grande utilidade no momento de realização e interpretação do exame. Os equipamentos modernos permitem selecionar, para realizar o exame DOP, qualquer uma das linhas que compõem um setor de tempo real. A variação da distância entre o transdutor e o "volume-amostra" permite posicioná-lo em qualquer local do plano de estudo<sup>3</sup>.

Como nem todas as hemácias que atravessam o "volume-amostra" têm a mesma velocidade, em cada instante não se percebe um, mas grande número de efeitos Doppler. Estes podem ser registrados por diversos métodos, que vão desde o histograma de frequências, até a análise espectral, pela obtenção, em cada instante, da intensidade relativa de cada componente da velocidade (proporção de hemácias com a mesma velocidade), através da análise rápida de Fourier<sup>4</sup>. Podem-se obter também a velocidade média, o desvio da média, etc.

Quando a maior parte das hemácias apresenta a mesma direção e velocidade, o tipo de fluxo denomina-se "laminar", identificando-se ao exame DOP pelo assvio em "crescendo", quando se aproxima do transdutor, ou em "descrescendo" quando se afasta registra-se uma curva de fluxo espectral denominada "faixa estreita" (fig. 2). Quando há alguma perturbação do fluxo, como na estenose valvar, o turbilhona-

mento após a obstrução produz um padrão caótico, denominado "turbulento"<sup>5</sup>. As diferentes direções das hemácias provocam, no exame DOP, um ruído áspero, como o amassar de papel, e o registro de uma curva de fluxo espectral de "faixa larga", característica desta alteração (fig. 3).

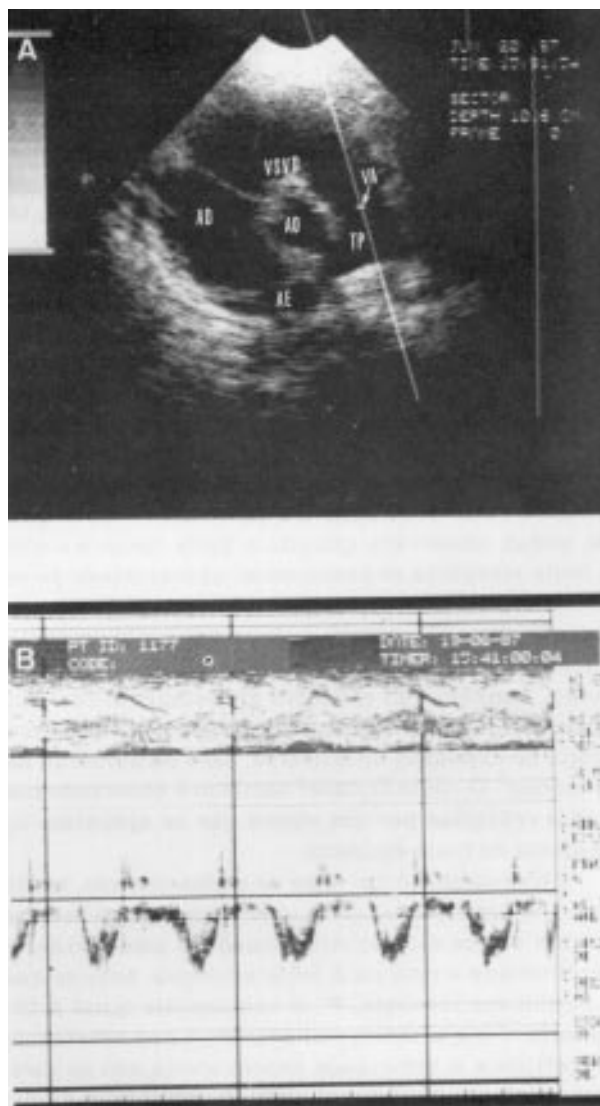


Fig. 2—A) Ecocardiograma bidimensional para-esternal transversal ao nível das grandes artérias, com o "volume-amostra" posicionado no tronco pulmonar distal à valva pulmonar. B) Registro da curva de fluxo pulmonar em análise espectral, laminar, inscrevendo-se abaixo da linha de base. VSVD = via de saída do ventrículo direito. TP = tronco pulmonar. AE = átrio esquerdo. AO = aorta. AD = átrio direito. VA = volume amostra.

## Metodologia

A sistemática utilizada para a análise do efeito Doppler nas diferentes cavidades ou nos vasos, relaciona-se diretamente com a sistemática empregada na ecocardiografia em tempo real<sup>6</sup>.

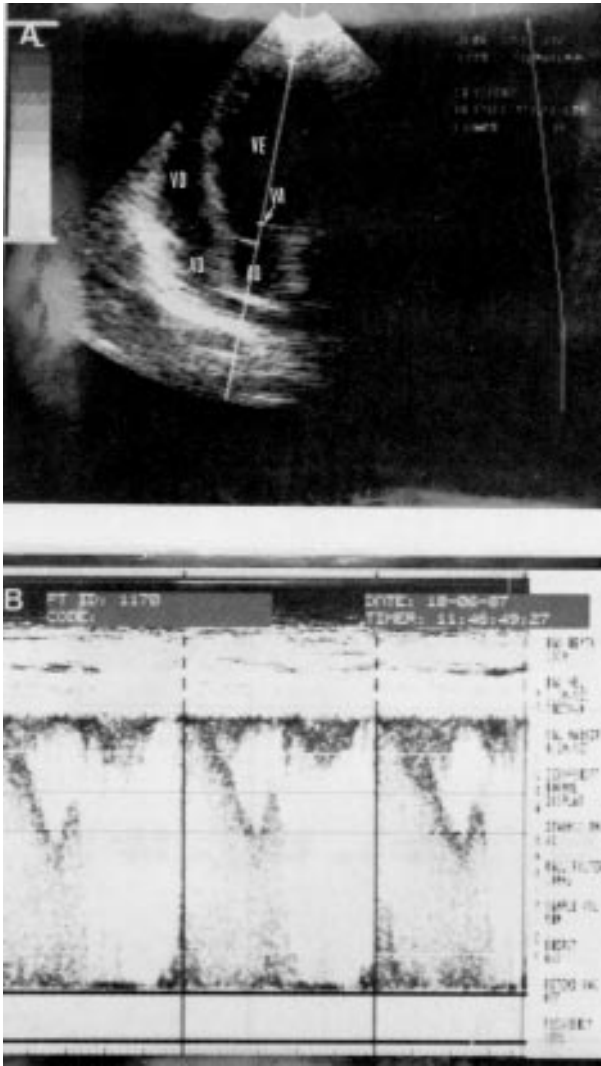
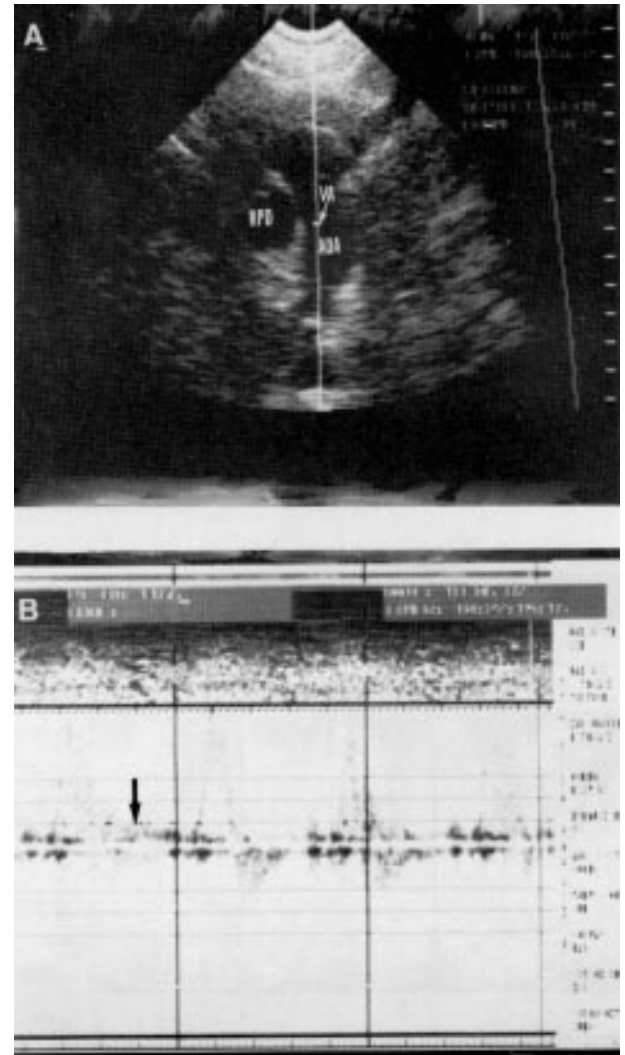


Fig. 3—A) Ecocardiograma bidimensional apical, quatro câmaras, com o “volume-amostra” posicionando na via de entrada do ventrículo esquerdo. B) Registro espectral Doppler demonstrando intensa turbulência diastólica, aumento de velocidade e alargamento da faixa espectral. VE = ventrículo esquerdo. AE = átrio esquerdo. AD = átrio direito. VD = ventrículo direito. VA = volume-amostra.

A posição ecocardiográfica que permite a visualização das quatro câmaras cardíacas, seja do ápex ou desde a região subcostal, é muito útil para o estudo atrioventricular direito e esquerdo, já que o ângulo entre o “volume-amostra” e a direção do fluxo sanguíneo é igual a zero. Deslocando-se o “volume-amostra” desde o interior do átrio esquerdo até o orifício da valva mitral, obtém-se fluxo diastólico positivo, cuja velocidade aumenta nas proximidades da valva. O primeiro componente corresponde ao fluxo atrioventricular protodiastólico rápido, seguido, na meso-diástole, por uma diminuição da velocidade e posterior aumento, coincidindo com a contração atrial. A curva de velocidade diastólica adota a forma de um M, semelhante ao movimento do folheto anterior da valva mitral na ecocardiografia modo-M<sup>7</sup> (fig. 4). Destaca-se a ausência de sinais de fluxo durante a

sístole. No interior da valva mitral, o contato dos folhetos com o “volume-amostra” produz estalidos característicos do movimento dos folhetos. Finalmente, na cavidade livre do ventrículo esquerdo, destaca-se um fluxo positivo diastólico correspondente ao enchimento ventricular e um fluxo negativo sistólico devido à ejeção ventricular.



**COLOCAR A FIGURA 4**

Fig. 4—Fluxo mitral. A) Ecocardiograma bidimensional, apical, quatro câmaras, com o “volume-amostra” distal à valva mitral. B) Registro da curva de fluxo em análise espectral, com morfologia em M, e ausência de fluxo durante a sístole (seta). VE = ventrículo esquerdo. AE = átrio esquerdo. AD = átrio direito. VD = ventrículo direito. VA = volume amostra.

Em presença de estenose mitral, obtém-se um sinal de fluxo turbulento, com velocidade média elevada, que diminui lentamente durante a meso-diástole, e que aumenta durante a contração atrial, em pacientes com ritmo sinusal<sup>8</sup>. Ao contrário do que ocorre na estenose mitral, a confirmação não-invasiva da regurgitação mitral é mais difícil, devido à ausência de sinais diretos. O exame com DOP é de grande utilidade nesta situação. O diagnóstico é realizado rastreando-se o átrio esquerdo à procura de turbulência

sistólica, cuja presença é, segundo a literatura e nossas observações, um sinal altamente específico<sup>9</sup>.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado para a valva tricúspide. O “volume-amostra” dirige-se desde o átrio direito até a via de entrada do ventrículo direito através da valva tricúspide. Como nas cavidades direitas a velocidade do fluxo é menor, o sinal Doppler também o é, porém mantendo morfologia espectral idêntica à do lado esquerdo.

Na estenose tricúspide, o papel do DOP é semelhante ao da estenose mitral, o critério diagnóstico consiste no registro de turbulência diastólica no ventrículo direito, distal ao orifício tricúspide<sup>10</sup>.

Na insuficiência tricúspide, o exame com o DOP é de grande importância, observando-se turbulência sistólica no átrio direito<sup>11</sup> e alterações nas velocidades da curva de fluxo das veias cavas<sup>12</sup>. A turbulência sistólica no átrio direito é um sinal altamente específico na insuficiência tricúspide.

O fluxo aórtico é analisado desde a região supra-esternal, de onde se obtêm imagens da aorta, arco aórtico e emergência dos troncos crânio-braquiais. Posicionando o “volume-amostra” na aorta ascendente, registra-se durante a sístole uma curva de fluxo laminar em crescendo, que se inscreve positivamente (fig. 5). Com o “volume-amostra” posicionado no arco aórtico, o ângulo entre o fluxo sanguíneo e o feixe de ultra-som se aproxima de 90°, anulando-se o sinal Doppler. O sinal reaparece quando o “volume-amostra” se localiza na aorta descendente, com um fluxo sistólico que se afasta do ponto de observação, registrando-se uma deflexão sistólica negativa.

As características elásticas das paredes da aorta condicionam algumas particularidades na curva de velocidade do fluxo aórtico. Com a ejeção ventricular, a coluna de sangue desloca-se para o ponto de observação com uma velocidade crescente durante a sístole. Esta velocidade diminui no final da ejeção ventricular e anula-se com o fechamento das sigmóides aórticas. A partir deste ponto e na diástole muito precoce, principalmente pela dilatação das paredes aórticas e, em parte, pela descida da valva aórtica, observa-se um afastamento da coluna sanguínea do ponto de observação. Registra-se, então, uma deflexão protodias-tólica negativa. Quando há regurgitação, este fenômeno se acentua significativamente.

Em presença de estenose aórtica, detecta-se intensa turbulência no interior e acima da valva durante a sístole, produzindo uma curva espectral de faixa larga<sup>13</sup>.

Na insuficiência aórtica, acentua-se o fluxo diastólico negativo observado desde a região supra-esternal<sup>14</sup>. O jato de regurgitação também pode ser detectado na via de saída do ventrículo esquerdo, realizando-se o exame desde a via apical ou subcostal, (fig. 6). A detecção de turbulência diastólica na via de saída do ventrículo esquerdo é um sinal altamente específico para o diagnóstico de insuficiência aórtica<sup>15</sup>.

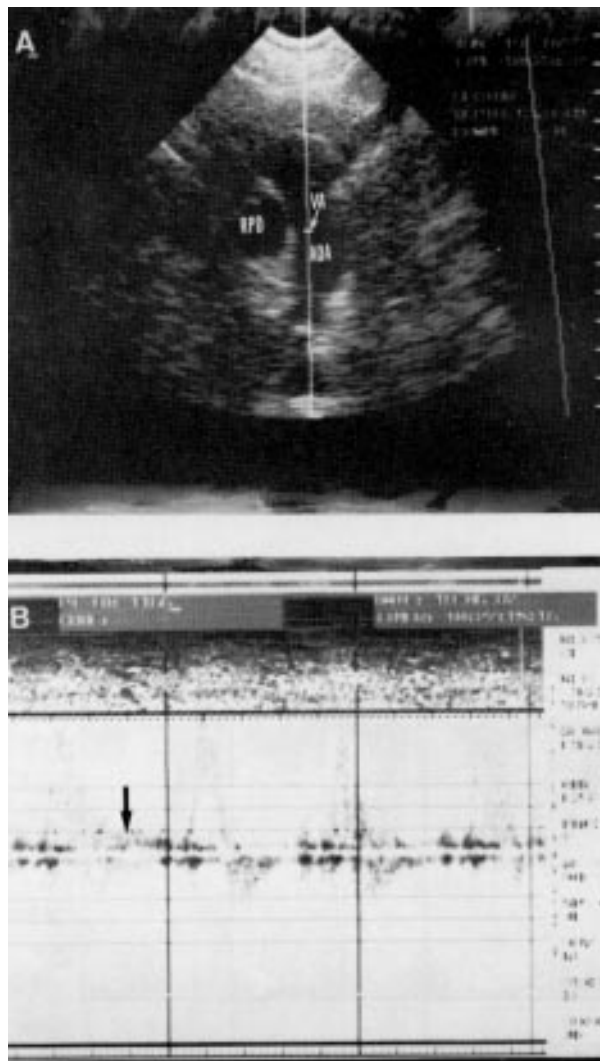


Fig. 5—Fluxo aórtico. A) Ecocardiograma bidimensional, longitudinal da aorta, desde a fúrcula, com o “volume-amostra” posicionado na aorta ascendente. B) Registro espectral do fluxo aórtico com morfologia característica, e ausência de fluxo durante a diástole (seta) RPD = ramo pulmonar direito. AOA = aorta ascendente

O fluxo da valva pulmonar estuda-se melhor desde a região paraesternal, na via de saída do ventrículo direito. Verifica-se um fluxo laminar negativo, de padrão semelhante ao observado na artéria pulmonar proximal.

Na estenose pulmonar, detecta-se um fluxo sistólico turbulento ao nível da artéria pulmonar<sup>16</sup>. Os critérios diagnósticos da estenose pulmonar são idênticos aos da estenose aórtica. A insuficiência pulmonar diagnostica-se pela detecção de turbulência diastólica na via de saída do ventrículo direito<sup>17</sup>, tendo-se encontrado uma incidência inesperada de regurgitação nos pacientes portadores de hipertensão pulmonar, secundária a outras valvopatias<sup>18</sup>.

### Aplicações Clínicas

As aplicações clínicas mais importantes do DOP consistem na determinação e caracterização dos pa-

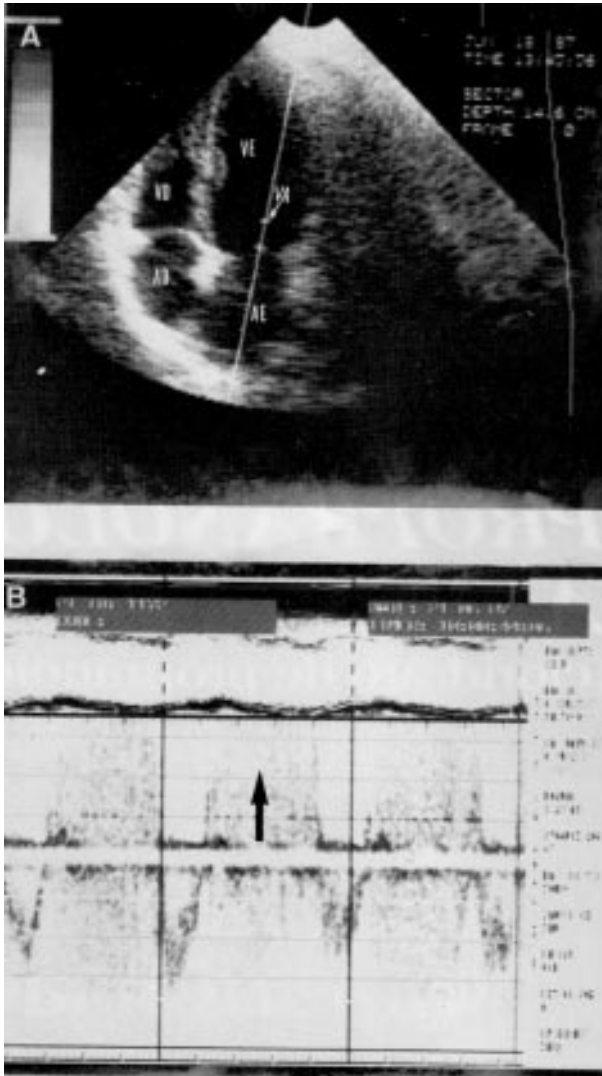


Fig. 6—A) Ecocardiograma bidimensional obtido desde o ápex, com o “volume-amostra” posicionado na via de saída do ventrículo-esquerdo, imediatamente abaixo do plano valvar aórtico. B) Registro Doppler em análise espectral, demonstrando intensa turbulência diastólica (seta) provocada pelo fluxo de regurgitação aórtica. VE = ventrículo esquerdo. AO = aorta. AD = átrio direito. VD = ventrículo direito.

drões, normais ou anormais, da velocidade do fluxo nas cavidades cardíacas ou nas grandes artérias. Estes dados complementam as informações obtidas pela ecocardiografia convencional, permitindo a apreciação das características do fluxo em regiões onde o registro ecocardiográfico é freqüentemente precário. Isto ocorre porque o sinal Doppler é máximo quando o feixe de ultra-som é paralelo ao fluxo sanguíneo, ao contrário da ecocardiografia convencional, na qual a reflexão máxima é obtida com o feixe de ultra-som perpendicular à estrutura reflectante.

O estudo com a ecocardiografia Doppler pulsado deve ser considerado toda vez que há necessidade de avaliar a função valvar ou a possibilidade de um “shunt” intra ou extracardíaco. As informações obtidas com este método complementam, com grau de

segurança, o exame clínico e outros exames não-invasivos, permitindo, por exemplo, a determinação da origem de sopros cardíacos observados clinicamente. Em pacientes com patologia valvar, os resultados do DOP complementam as observações morfológicas<sup>19</sup> além de possibilitar a estimação não-invasiva do gradiente nos casos de estenose.

#### REFERÊNCIAS

1. Sears, Z.—Física General Madri Aguitar, 1957.
2. Baker, D W; Rubenstein, S. A.; Lorch, G. S.—Pulsed Doppler echocardiography. Principles and applications. Am J Med, 63: 69, 1977.
3. Griffith, J. M.; Henry W. L.—An ultrasound system for combined cardiac imaging and Doppler blood flow measurement: Circulation, 57: 925, 1978.
4. Lorch, G. S.; Rubenstein, S. A.; Baker D. W.—echocardiography. Use of a graphical display system. Circulation, 56: 576, 1977.
5. Baker, D. W.—The present role of Doppler techniques in cardiac diagnosis. Prog Cardiovasc Dis, 21: 79, 1978.
6. Yuste, P.; Garcia Fernandez, M. A.—Atlas de Ecocardiografia Bidimensional y Doppler. Madri, Norma, 1982.
7. Kalmanson, D.; Veyrat, C.; Bonchacine, F.; Degrote, A— Non-invasive recording of mitral valve flow velocity patterns using pulsed Doppler echocardiography. Br Heart J, 39: 517, 1977.
8. Almazán, A.; Garcia Dorado, A. D.; Falzgraf, S.; Karoni, S.; Keh, F.; Delcan J. L.; Menárguez, L.—Estudio de la valvulopatía mitral reumática mediante ultrasonido Doppler de onda pulsada. Rev Esp Cardiol, 1: (suppl) 7, 1981.
9. São José, M. C.; Del Castillo, J. M.; Oliveira, P. A. F.; Bacelar, A. T.; Melo Sobrinho, O. H.— Estudio ecocardiográfico bidimensional-Doppler pulsado das valvopatias mitral e aórtica. Arq. Bras. Cardiol, 45: 243, 1985.
10. Loeber, C. P.; Goldberg, S.; Allen, H. D.—Doppler echocardiographic comparison of flows distal to the four cardiac valves. J Am Coll Cardiol, 4: 268, 1984.
11. Garcia Dorado, D.; Falzgraf, S.; Almazán, A.; Delcán, J. L.; Lopez Bescos, L.; Menarguez, L. — Diagnosis of functional tricuspid insufficiency by pulsed wave Doppler ultrasound. Circulation, 66: 1315, 1982.
12. Fortuin, F.; Mangherini, A.—L’ecocardiografia-doppler nella diagnosi de vizi tricuspideali. Gaz Ital Cardiol, 8: 879, 1978.
13. Garcia Dourado A. D.; Almazán, A.; Lopes Bescós, L.; Falzgraf, S.; Delcán, J. L.; Menárguez, L.—Diagnosis of aortic valve diseases by Doppler ultrasound. Eur Heart J, 2: (Suppl.) 113, 1981.
14. Quinones, A. M.; Young, J. B.; Waggoner, A. D.; Miodrag, C. O.; Lair G. T. E.; Miller, R. R.— Assessment of pulmonary Doppler echocardiography in detection and quantification of aortic and mitral regurgitation. Br Heart J, 44: 612, 1980.
15. Veyrat, C.; Lessana, A.; Abitbol, G.; Ameur, A.; Benaim, R.; Kalmanson, D. — New indexes for assessing aortic regurgitation with two-dimensional Doppler echocardiographic measurement of the regurgitant aortic valvular area. Circulation, 68: 998, 1983.
16. Goldberg, S. J.; Areias, J. C.; Spitaels, J. E. C.; De Villeneuve, V. H.—Echo Doppler detection of pulmonary stenosis by time interval histogram analysis. J Clin Ultrasound, 7: 183, 1979.
17. Miytake, K. Okamoto, H.; Kinoshito, N.; Matsuhisa, M.; Nogata, S.; Bepu, S.; Sakakibara, H.; Nimura, Y.—Pulmonary regurgitation studied with the ultrasonic Doppler technique. Circulation, 65: 960, 1982.
18. Ashvin, K. P.; Rowe, G. G.; Shiraz, P. D.; Kosolcharow, P.; Ellen, W. E.; Thomsen, J. H.— Pulsed Doppler echocardiography in diagnosis of pulmonary regurgitation. Its value and limitations. Am J Cardiol, 49: 1801, 1982.
19. Peariman, A. S.; Stevenson, J.; Baker, D. W. —Doppler echocardiography. Applications, limitations and future directions. Am. J. Cardiol, 46: 1256, 1980.