

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Parámetros hemodinámicos en el proceso normal de la erección



Juan Fernando Uribe Arcila

Urólogo, Medicina Sexual Ciudad del Río, Medellín, Colombia

Recibido el 14 de abril de 2015; aceptado el 25 de mayo de 2015

Disponible en Internet el 7 de julio de 2015

PALABRAS CLAVE

Erección peneana;
Disfunción eréctil;
Ultrasonografía
doppler;
Impotencia
vasculogénica;
Anatomía del pene

Resumen El proceso normal de la erección tiene 6 fases hemodinámicas definidas: flaccidez, erección latente (pre-erección), tumescencia, erección máxima, rigidez y detumescencia. Durante este proceso ocurren cambios en la dilatación de la arteria cavernosa, aumento del flujo sanguíneo pudiendo, de la presión intracavernosa y de la presión al final de la diástole; estos cambios se reflejan a su vez en el índice de resistencia, concentración de oxígeno y el grado de erección, que es la representación clínica de todo el proceso. El flujo sanguíneo pudiendo debe aumentar sin limitaciones hasta que se produce el fenómeno de la venoclusión que precede a la rigidez, lo que es la clave del sistema para ahorrar energía manteniendo una erección adecuada con el mínimo gasto de sangre. Cada una de las fases mencionadas tiene también una representación durante la ecografía doppler de pene, lo que convierte a las imágenes ultrasonográficas en una herramienta costo efectiva para el diagnóstico adecuado de diferentes problemas vasculares que afectan la hemodinamia normal.

© 2015 Sociedad Colombiana de Urología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Penile erection;
Erectile dysfunction;
Doppler ultrasound of
penis;
Vasculogenic
impotence;
Penile anatomy

Haemodynamic parameters in normal process of erection

Abstract The normal process of erection has six defined haemodynamic phases: Flaccidity, latent erection (Pre-erection), tumescence, full erection, rigidity erection, and detumescence. During this process there are changes in cavernosal arterial dilation, increase in pudendal blood flow, intracavernous pressure, and the pressure at the end of diastole. These changes are reflected, in turn, in the resistance index (RI), oxygen concentration, and degree of erection, that is the clinical representation of the whole process. Pudendal blood flow should increase without limitations until the phenomenon of venous occlusion preceding rigidity occurs, which is the key

system to save energy while maintaining an adequate erection with minimum expense of blood. Each of the phases mentioned also has a representation by penile Doppler ultrasound, which makes the ultrasound images a cost effective tool for the appropriate diagnosis of different vascular problems affecting normal haemodynamics.

© 2015 Sociedad Colombiana de Urología. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

Está bien documentado que la función eréctil esta gobernada por varios componentes interdependientes: hormonales, vasculares, neurológicos, sinusoidales, musculares y psicológicos. El advenimiento de mejores equipos de ultrasonografía doppler, tomógrafos para cavernotomografías, e incluso cavernorresonancia, han permitido comprender mucho mejor el proceso de la erección y sus diferentes fases hemodinámicas. Los diferentes métodos diagnósticos son objetivos y medios adecuados para documentar la hemodinamia peneana, pero requieren de personal muy bien entrenado y equipos modernos no siempre disponibles. Como primer paso, la comprensión del comportamiento de la hemodinamia normal permite entender al paciente que disfunciona, puesto que el origen vascular es clave en un amplio número de pacientes, incluyendo los cambios que se avencinan por las nuevas teorías que involucran a la túnica albugínea como un factor que favorece o desfavorece la competencia venosa, además de la reformulación de las hipótesis sobre la rigidez peneana basada en el sistema venoso, y por la posibilidad de los procedimientos endovasculares como una alternativa al tratamiento de ciertos tipos de disfunción eréctil. La fantástica sinfonía que implica el proceso de erección apenas si se vislumbra en los datos condensados en la [figura 1](#), que serán sin duda un valioso aporte para todos aquellos interesados en develar el intrincado funcionamiento del órgano peneano¹⁻⁵.

Términos hemodinámicos

- Flujo pudendo (FP): flujo en cc/seg en la arteria pudenda, precursor de las cavernosas.
- Índice de resistencia (IR): corresponde a la PS-PD/PS. Valores cercanos a 1 hablan de baja resistencia, cercanos a 0 de alta resistencia.
- Intracavernoso: que ocurre en el interior del cuerpo cavernoso.
- Oxigenación (O₂): concentración de oxígeno en sangre arterial.
- Presión penil (PP): presión en cc/seg a nivel de las arterias cavernosas.
- Presión diastólica: corresponde a la presión al final de la diástole en cada ciclo cardíaco en arterias cavernosas.
- Presión sistólica braquial: corresponde a la presión sistólica periférica que no siempre coincide con la PP intracavernosa.

Fases de la erección

Durante el proceso normal de la erección se reconocen 6 fases hemodinámicas diferentes; se debe tener en cuenta que la fase 4 se repite en espejo luego de alcanzar rigidez, retornando a "erección máxima", y que adicionar esta subfase facilita la comprensión del proceso de detumescencia que necesita este paso intermedio antes de llegar a la detumescencia total⁶⁻¹².

Fase 1. Flacidez o estado basal

Es el estado de reposo para el pene. El flujo por la arteria pudenda es bajo y suficiente para la nutrición del tejido. La presión al final de la diástole es casi 0, puesto que no existe resistencia alguna, por lo que el IR es muy cercano a 1 (pero no igual). La sangre en el pene es de tipo venoso y la concentración de oxígeno es baja, lo que facilita la aparición de sustancias profibróticas como el factor TGF β 1 y la endotelina, que promueven la fibrosis cavernosa. La onda de la ecografía doppler muestra un pequeño pico sistólico, sin presión al final de la diástole¹³⁻²¹.

Fase 2. Erección latente o preerección

Para que se desarrolle esta fase efímera ha ocurrido algún tipo de estímulo (visual, táctil, auditivo, ligado al sueño) que activó el proceso de la erección, comenzando el estímulo neural por vía del nervio pudendo. El flujo peneano vía arteria pudenda aumenta intensamente, con una gran dilatación de la arteria y con aumento progresivo de la PP o intracavernosa, existe un cambio de la mezcla de sangre que se hace más arterial y un aumento concomitante de la concentración de oxígeno. La onda de la ecografía doppler muestra un pequeño aumento del pico sistólico, con un enorme aumento de la presión al final de la diástole e incremento del IR que se hace menor de 1.

Fase 3. Tumescencia

En esta fase el estímulo (visual, táctil, auditivo, ligado al sueño) fue exitoso para activar el proceso de la erección. El flujo peneano vía arteria pudenda disminuye un poco, con menor gasto de sangre para mantener la erección, existe disminución de la dilatación de la arteria y la PP o intracavernosa comienza a bajar; existe un cambio de la mezcla de

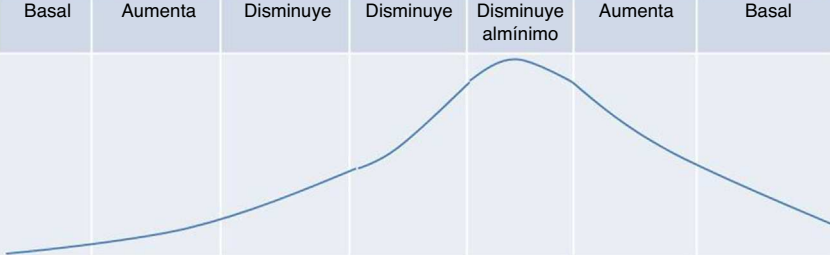
	1	2	3	4a	5	4b	6
Etapas	Flaccidez	Latente	Tumesciente	Erección máxima	Rigidez	Erección máxima	Detumescencia
Grado de erección	Flaccidez	Tumescencia leve	Tumescencia moderada	Erección con venoclusión	Rigidez	Erección se abre venoclusión	Tumescencia (Hacia flaccidez)
Arteria	Basal	↑ Dilatación (Hiperdilatación)	↓ Dilatación	↓ Dilatación	↓ Dilatación (Mínima)	↑ Dilatación (Igual etapa 4)	Basal
Imagen de la arteria							
Onda de ecografía							
Flujo pudendo (curva)							
Flujo pudendo	Basal	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Disminuye al mínimo	Aumenta	Basal
Presión ICC o penil (curva)							
Presión ICC o penil	Basal	↑	↑	↑	↑↑ (P. cavernosa supera la P. sistólica)	↓	↓ (Hacia basal)
Presión diastólica	0	↑↑	↓	↓ (P. negativa o reversa)	0	Estable (P. puede ser negativa)	0
Relación PP/PD	PP > PD	PP > PD	PP > PD	PP > PD (PD = 0 ó neg)	PP > PD	PP > PD (PD = 0 ó neg)	PP > PD
Estímulo neural pudendo	-	+	+	+	+	+	-
Tipo de sangre IIC	Venosa	Arterial	Arterial	Arterial	Isquemia	Arterial	Venosa
[O₂]	Baja	Alta	Alta	Muy alta	Baja	Muy alta	Baja
I.R.	< 1	< 1	< 1	1	1	1	< 1

Figura 1 Las seis etapas del proceso de erección normal y los parámetros hemodinámicos de cada una.

sangre que se hace más arterial y un aumento concomitante de la concentración de oxígeno. El IR cae más con notable disminución de la presión al final de la diástole. La onda de la ecografía doppler muestra que el pico sistólico aumenta un poco más que en la fase anterior y los latidos se separan.

Fase 4 a. Erección máxima

El FP se estabiliza, lo mismo que la presión intracavernosa, el flujo diastólico cae tanto que se hace incluso negativo,

con un IR igual a 1. La concentración de oxígeno en el abundante flujo sanguíneo es óptima y el proceso de venoclusión comienza a darse naturalmente. La onda de la ecografía doppler refleja lo anterior con un pico sistólico definido y una presión al final de la diástole en cero o negativa.

Fase 5. Rigidez

La arteria muestra el mínimo de dilatación. Con la venoclusión activada, el flujo sistólico cae, manteniendo la erección

en su máximo de rigidez, la presión diastólica es cero, pero la concentración de oxígeno no es óptima por bajo flujo, que de perpetuarse sería de riesgo isquémico. El IR se mantiene en 1. La onda de la ecografía doppler refleja un pequeño pico sistólico y una presión al final de la diástole en cero.

Fase 4 b. Erección máxima

El FP aumenta nuevamente, aunque la presión a intracavernosa comienza a caer liberando el proceso de venoclusión, el flujo diastólico nuevamente se hace igual a cero o negativo, con un IR igual a 1. La concentración de oxígeno aumenta nuevamente. La onda de la ecografía doppler muestra un pico sistólico definido y una presión al final de la diástole en 0 o negativa.

Fase 6. Detumescencia

En el paciente normal ha ocurrido el disparo simpático que acompaña a la eyaculación o ha cesado el estímulo sexual, por lo que la erección empieza a caer; la venoclusión ya no es efectiva. La presión sistólica intracavernosa cae y la presión al final de la diástole es casi 0; el IR se acerca a 1 (pero no es igual). La sangre nuevamente adquiere parámetros venosos. La onda de la ecografía doppler es igual a la del principio en estado basal^{22-25,16,26-46}.

Conclusión

Este artículo es un compendio del conocimiento adquirido en la hemodinámica del pene, que es a su vez la base para comprender adecuadamente la disfunción eréctil de tipo vascular. Los profesionales interesados en profundizar en la pesquisa mediante el uso del doppler dúplex de pene (urólogos/andrólogos o radiólogos), deben entrenarse adecuadamente en la herramienta, puesto que es el método más costo-efectivo para hacer adecuados diagnósticos. Para autores como Aversa⁴⁷, es necesario que se realicen al menos 200 exámenes por año para considerar que el médico tiene un entrenamiento adecuado y alcanza niveles de calidad confiable. Este es un campo promisorio que tendrá desarrollo en el futuro con la llegada de mejores equipos.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Christ GJ. The penis as a vascular organ. The importance of corporal smooth muscle tone in the control of erection. *Urol Clin North Am.* 1995;22:727-45.
- Shafik A, Shafik I, El Sibai O, Shafik AA. On the pathogenesis of penile venous leakage: Role of the tunica albuginea. *BMC Urol.* 2007;7:14.
- Hsu GL, Hung YP, Tsai MH, Hsieh CH, Chen HS, Molodysky E, et al. Penile veins are the principal component in erectile rigidity: A study of penile venous stripping on defrosted human cadavers. *J Androl.* 2012;33:1176-85.
- Jannini EA, Lenzi A, Isidori AM, Subclinical Fabbri A. Erectile dysfunction: Proposal for a novel taxonomic category in sexual medicine. *J Sex Med.* 2006;3:787-94.
- Virag R, Paul JF. New classification of anomalous venous drainage using caverno-computed tomography in men with erectile dysfunction. *J Sex Med.* 2011;8:1439-44.
- Lue TF. Physiology of penile erection and pathophysiology of erectile dysfunction and priapism. En: Walsh PC, Retik AB, Vaughan ED, Wein AJ, editores. *Campbell's Urology*. 7th ed. Philadelphia: WB Saunders Co; 1998. p. 1157-1179.
- Carrier S, Brock G, Kour NW, Lue TF. Pathophysiology of erectile dysfunction. *Urology.* 1993;42:468-81.
- Debora M, Daniele A, Alessandro B, Ferri C, Giuseppe M. The role of doppler ultrasound in the diagnosis of vasculogenic impotence. *Arch Ital Urol Androl.* 2010;82:159-63.
- Altinkilic B, Hauck EW, Weidner W. Evaluation of penile perfusion by color-coded duplex sonography in the management of erectile dysfunction. *World J Urol.* 2004;22:361-4.
- Kim SH, Paick JS, Lee SE, Choi BI, Yeon KM, Han MC. Doppler sonography of deep cavernosal artery of the penis: Variation of peak systolic velocity according to sampling location. *J Ultrasound Med.* 1994;13:591-4.
- Lue TF, Mueller SC, Jow YR, Hwang TI. Functional evaluation of penile arteries with duplex ultrasound in vasodilator induced erection. *Urol Clin North Am.* 1989;16:799-807.
- Mancini M, Bartolini M, Maggi M, Innocenti P, Forti G. The presence of arterial anatomical variations can affect the results of duplex sonographic evaluation of penile vessels in impotent patients. *J Urol.* 1996;155:1919-23.
- Belew D, Klaassen Z, Lewis RW. Intracavernosal injection for the diagnosis, evaluation, and treatment of erectile dysfunction: A review. *Sex Med Rev.* 2015;3:11-23.
- Sikka SC, Hellstrom WJ, Brock G, Morales AM. Standardization of vascular assessment of erectile dysfunction: Standard operating procedures for duplex ultrasound. *J Sex Med.* 2013;10:120-9.
- Benson CB, Vickers MA. Sexual impotence caused by vascular disease: Diagnosis with duplex ultrasonography. *Am J Radiol.* 1989;153:1149-55.
- Benson CB, Aruny JE, Vickers MA Jr. Correlation of duplex sonography with arteriography in patients with erectile dysfunction. *AJR Am J Roentgenol.* 1993;160:71-3.
- Mancini M, Bartolini M, Maggi M, Innocenti P, Villari N, Forti G. Duplex ultrasound evaluation of cavernosal peak systolic velocity and waveform acceleration in the penile flaccid state: Clinical significance in the assessment of the arterial supply in patients with erectile dysfunction. *Int J Androl.* 2000;23:199-204.
- Lue TF, Hricak H, Marich KW, Tanagho EA. Vasculogenic impotence evaluated by high-resolution ultrasonography and pulsed Doppler spectrum analysis. *Radiology.* 1985;155:777-81.
- Wilkins CJ, Sriprasas S, Sidhu PS. Colour doppler ultrasound of the penis. *Clin Radiol.* 2003;58:514-23.
- Speel TG, van Langen H, Wijkstra H, Meuleman EJ. Penile duplex phar-maco-ultrasonography revisited: Revalidation of the parameters of the cavernous arterial response. *J Urol.* 2003;169:216-20.
- Oates CP, Pickard RS, Powell PH, Murthy LN, Whittingham TA. The use of duplex ultrasound in assessment of arterial supply to the penis in vasculogenic impotence. *J Urol.* 1995;153:354-7.
- Bagheri SM, Gharib MH. How can a radiologist reveal more practical information using dynamic study of cavernosal artery after injection of vasoactive agents? *Iran J Radiol.* 2015;12:e12556.
- Sohn M, Hatzinger M, Goldstein I, Krishnamurti S. Standard operating procedures for vascular surgery in erectile dysfunction: Revascularization and venous procedures. *J Sex Med.* 2013;10:172-9.

24. Akre C, Berchtold A, Gmel G, Suris JC. The evolution of sexual dysfunction in young men aged 18-25 years. *J Adolescent Health*. 2014;55:736-43.
25. Gilbert BR, Paduch D. Penile doppler ultrasound. post graduate course. AUA Annual Meeting, Orlando Fla. 2014 May 17.
26. Bagi P, Sillesen H, Bitsch K, Hansen HJ. Doppler waveform analysis in evaluation of occlusive arterial disease in the lower limb: Comparison with distal blood pressure measurement and arteriography. *Eur J Vasc Surg*. 1990;4:305-11.
27. Corona G, Fagioli G, Mannucci E, Romeo A, Rossi M, Lotti F, et al. Penile doppler ultrasound in patients with erectile dysfunction (ED): Role of peak systolic velocity measured in the flaccid state in predicting arteriogenic ED and silent coronary artery disease. *J Sex Med*. 2008;5:2623-34.
28. El-Sakka AI, Morsy AM. Screening for ischemic heart disease in patients with erectile dysfunction: Role of penile doppler ultrasonography. *Urology*. 2004;64:346-50.
29. Sarteschi LM, Montorsi F, Menchini-Fabris F, Guazzoni G, Lencioni R, Rigatti P. Cavernous arterial and arteriolar circulation in patients with erectile dysfunction: A power doppler study. *J Urol*. 1998;159:428-32.
30. Virag R, Bouilly P, Frydman D. Is impotence an arterial disorder? A study of arterial risk factors in 440 impotent men. *Lancet*. 1985;1(181).
31. Patel U, Amin Z, Friedman E, Vale J, Kirby RW, Lees WR. Colour flow and spectral doppler imaging after papaverine induced penile erection in 220 impotent men: Study of temporal patterns and the importance of repeated sampling, velocity asymmetry and vascular anomalies. *Clin Radiol*. 1993;48:18.
32. Gill RW. Measurement of blood flow by ultrasound: Accuracy and sources of error. *Ultrasound Med Biol*. 1985;11:625-41.
33. Jarow JP, Pugh VW, Routh WD, Dyer RB. Comparison of penile duplex ultrasonography to pudendal arteriography. Variant penile arterial anatomy affects interpretation of duplex ultrasonography. *Invest Radiol*. 1993;28:806-10.
34. Valji K, Bookstein JJ. Diagnosis of arteriogenic impotence: Efficacy of duplex sonography as a screening tool. *AJR Am J Roentgenol*. 1993;160:65-9.
35. Mills RD, Sethia KK. Reproducibility of penile arterial colour duplex ultrasonography. *Br J Urol*. 1996;78:109-12.
36. Schaeffer EM, Jarow JP Jr, Vrablic J, Jarow JP. Duplex ultrasonography detects clinically significant anomalies of penile arterial vasculature affecting surgical approach to penile straightening. *Urology*. 2006;67:166-9.
37. Roy C, Saussine C, Tuchmann C, Castel E, Lang H, Jacqmin D. Duplex doppler sonography of the flaccid penis: Potential role in the evaluation of impotence. *J Clin Ultrasound*. 2000;28:290-4.
38. Sarteschi LM, Palego P, Lencioni R. Eco-color doppler peniena dinamica: Quadro normale. En: Sarteschi LM, Menchini Fabris GF, editores. *Ecografia andrologica*. Modena, Italy: Athena Audiovisuals; 2003. p. 173-84.
39. Rastrelli G, Corona G, Lotti F, Aversa A, Bartolini M, Mancini M, et al. Flaccid penile acceleration as a marker of cardiovascular risk in men without classical risk factors. *J Sex Med*. 2014;11:173-86.
40. Slob AK, Cornelissen S, Dohle GR, Gijs L, van der Werff ten Bosch JJ. The limited practical value of color doppler sonography in the differential diagnosis of men with erectile dysfunction. *Int J Impot Res*. 2002;14:201-3.
41. Shamloul R. Peak systolic velocities may be falsely low in young patients with erectile dysfunction. *J Sex Med*. 2006;3:138-43.
42. Kawanishi Y, Izumi K, Muguruma H, Mashima T, Komori M, Yamanaka M, et al. Three-dimensional CT cavernosography: reconsidering venous ligation surgery on the basis of the modern technology. *BJU Int*. 2011;107:1442-6.
43. Meuleman EJ, Bemelmans BL, van Asten WN, Doesburg WH, Skotnicki SH, Debruyne FM. Assessment of penile blood flow by duplex ultrasonography in 44 men with normal erectile potency in different phases of erection. *J Urol*. 1992;147:51-6.
44. Sadeghi Nejad H, Brison D, Dogra V. Male erectile dysfunction. *Ultrasound Clin*. 2007;57-71.
45. Fitzgerald SW, Erickson SJ, Foley WD, Lipchik EO, Lawson TL. Color doppler sonography in the evaluation of erectile dysfunction: Patterns of temporal response to papaverine. *AJR Am J Roentgenol*. 1991;157:331-6.
46. Quam JP, King BF, James EM, Lewis RW, Brakke DM, Ilstrup DM, et al. Duplex and color doppler sonographic evaluation of vasculogenic impotence. *AJR Am J Roentgenol*. 1989;153:1141-7.
47. Aversa A, Sarteschi LM. The role of penile color-duplex ultrasound for the evaluation of erectile dysfunction. *J Sex Med*. 2007;4:1437-47.