



Revista Urología Colombiana

ISSN: 0120-789X

revistaurologiacolombiana@scu.org.co

Sociedad Colombiana de Urología

Colombia

Uribe Arcila, Juan Fernando

Parte I. El pene fractal. Una conjetura matemática aplicando la geometría fractal a la estructura peneana

Revista Urología Colombiana, vol. XVI, núm. 1, abril, 2007, pp. 51-65

Sociedad Colombiana de Urología

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149120468004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Parte I

El pene fractal

Una conjetura matemática aplicando la geometría fractal a la estructura peneana.

Uribe Arcila Juan Fernando

Miembro de número
Hospital Pablo Tobón Uribe -Medellín

Resumen

La geometría fractal es la utilizada por la naturaleza para fabricar estructuras a todo nivel, en especial el anatómico. Usando este conocimiento universal, en este artículo se propone una singular conjetura matemática que describe el pene como una estructura compleja que no es posible describir o medir parcial, ni globalmente mediante la simple geometría Euclidiana tradicional. Igualmente se propone que la estructura del pene posee alguna clase de auto-semejanza en su construcción, posiblemente estadística, por medio de algoritmos que se expresan matemáticamente como un número complejo cuya escala se desconoce, pero que sin duda constituye la base de lo que se considera como la geometría fractal. La utilidad de este conocimiento tiene algunas aplicaciones en el presente pero sobretodo será útil en el futuro para una mejor comprensión de patologías como las fracturas de pene, la enfermedad de Peyronie y sobretodo el uso de la ingeniería genética y la aplicación de nanotecnologías en la estructura del pene. Más interesante es considerar la erección como un “sistema” y la disfunción eréctil como una desorganización de ese sistema, aplicando los postulados de la “teoría del caos” que permiten aproximarse al trastorno desde el punto de vista matemático y que será el objeto del un próximo artículo sobre el tema.

Introducción

Una **Conjetura** (*Del lat. coniectūra*) es el valor otorgado (de tipo moral, ético o matemático) a las cosas o sucesos por indicios y observaciones. En matemáticas, la expresión *conjetura* se refiere a una afirmación que se

supone cierta, pero que no fue probada ni refutada hasta la fecha.

El presente ensayo es una *conjetura biológica* sobre un órgano específico con una base matemática que busca explicar tres cosas diferentes:

En la **Parte I** que es el presente capítulo: Se presenta al **pene** como una estructura fractal compleja. En la **Parte II** se presentará la

erección como el producto de un sistema eréctil y a la **disfunción eréctil** como parte de un proceso entrópico que hace parte de la teoría del caos y finalmente en la **Parte III**: Se presentará el pene como una potencial estructura con proporciones áureas y su posible relación con la espiral universal.

Parte I

El Pene como una estructura fractal compleja

¿Qué son los fractales?

La definición de la geometría en general es la de “una ciencia que estudia las figuras en el espacio”; los fractales son una parte de esa ciencia que se usa para el estudio específico de los espacios complejos tan frecuentes en medicina o biología y en general en la naturaleza puesto que los árboles, nubes, rocas, montañas o tejidos humanos necesitan de una geometría especial que los describa.^{1,2,3,4,5,6}

Es diferente a la geometría lineal tradicional descrita por el matemático griego Euclides (325- 265 a.c.) que se basa en rectas, puntos, planos, esferas y en general en espacios simples y que es incapaz de explicar estos espacios irregulares. Los fractales usan en cambio algoritmos iterativos que describen mejor los sistemas naturales, caóticos y dinámicos, por lo que también se le conoce como “*geometría de la naturaleza*”, puesto que permite describir con gran realismo las estructuras naturales como las anteriores y en el organismo los vasos sanguíneos, redes de neuronas, huesos, trabéculas o pilares del pene.

Los objetos fractales fueron creados intuitivamente por el ingenio humano mucho antes de desarrollarse formalmente la llamada “Geometría Fractal” por lo que pueden encontrar y reconocer figuras históricas con características fractales semejantes al clásico “*triángulo de Sierpinski*”, una de las primeras imágenes de los fractales en grabados de tela árabes o pinturas Japonesas de varios siglos atrás (Figura 1).^{1, 2, 3, 4}

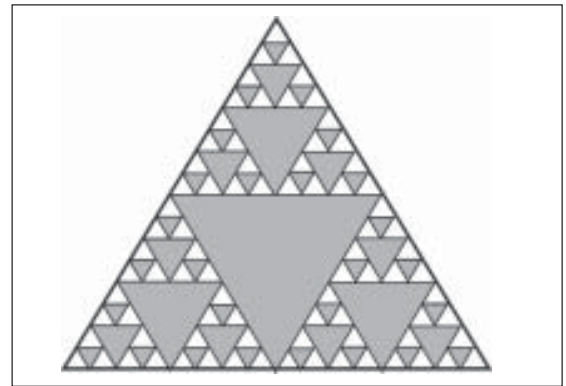


Figura 1. El Triángulo de Sierpinski diseñado por Waclaw Sierpinsky. Uno de los fractales más conocidos

Un grupo de matemáticos comenzó a darse cuenta que en la naturaleza se daba muy a menudo el fenómeno de ciertas irregularidades que no eran excepciones de la regla como se suponía, eran la norma. Entre los primeros investigadores que comenzaron a demostrar estos problemas estaba George Ferdinand Cantor quien en sus trabajos subdividió una recta en conjuntos sucesivos donde se retira en cada vez el segmento central repitiendo el proceso en “n” veces hasta obtener un “*polvillo muy fino*”, con divisiones que teóricamente podrían ir hasta el infinito formando otro de los fractales clásicos llamado el “Conjunto de Cantor”. (Figura 2)^(1,7)

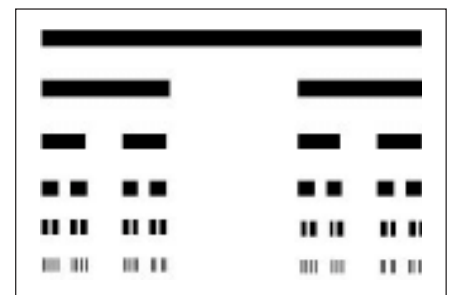


Figura 2: El “Conjunto triádico o polvo de Cantor” de George F. Cantor. El segundo fractal clásico.

Pero el nacimiento de los fractales puede situarse mejor en el año 1958 cuando el matemático Polaco-Francés Benoit Mandelbrot (1924 -) ingresó a trabajar en los laborato-

rios de investigación Thomas Watson de la IBM para realizar un análisis del ruido y perturbaciones eléctricas en las líneas telefónicas utilizadas para transmitir información en su red de ordenadores y que enloquecía a los técnicos de comunicaciones de la compañía. Ese ruido era insalvable causando interferencias y con ellas errores continuos. Era como si la radiación de fondo del universo estuviera siempre presente. Mientras realizaba dichas pruebas, Mandelbrot encontró un patrón en ese comportamiento y comenzó a descifrar una estructura escondida. Algo así como jerarquías de fluctuaciones en todas las escalas que no podían ser descritas por la matemática estadística disponible y se imaginó que en otros sistemas se podrían encontrar patrones similares que no fueran descritos con exactitud por la matemática existente.^{3, 4, 5, 8}

El término **'fractal'** lo acuñó luego Mandelbrot hojeando un diccionario de latín, cuando decidió fusionar las palabras *fractus* (romper) + *fracture* (roto o fracturado), dándole al neologismo una función doble de verbo/adjetivo, asociándolo con las discontinuidades de las funciones matemáticas en objetos tridimensionales e irregulares tales como el pene y sus estructuras de soporte como pilares o tabiques y en general en cualquiera otro espacio natural aplicable en la conjetura que intento describir.^{1,3,4,5,9,10,11,12,13,14,15}

Los fractales deben cumplir con una paradoja asombrosa: Su área o superficie es finita, es decir, tiene límites. Por el contrario, su perímetro o longitud es infinita, es decir, no tiene límites, por eso una de sus preguntas clásicas durante el esbozo de su teoría fue: *¿Cuánto mide realmente la costa de Inglaterra?* Y aunque en un libro de geografía o en un mapa se podría obtener una respuesta adecuada, la solución a esa pregunta aparentemente sencilla puede plantearse desde diferentes puntos de vista: Midiendo la imagen de la costa desde la distancia de un satélite, desde un avión volando a baja altura o parados en la misma costa con una regla y midiendo roca por roca. Cada medida sería diferente e inexacta.^{1,5,9}

Igual pueden aplicarse diferentes escalas para medir la estructura naturales. En un ejemplo usando los cuerpos cavernosos penianos se pueden medir con facilidad las curvas simples del pene un corte macroscópico (figura 3A), otra longitud diferente se obtiene si se miden los mayores detalles del tejido visto bajo el microscopio de luz (figura 3B) y finalmente un tercer caso se genera al medir los detalles muy amplificados que se observan en el tejido con un microscopio electrónico (figura 3C).



Figura 3A. Un corte macroscópico tomado del "Atlas of tumor pathology" de la Army Force Institute of Pathology (AFIP)

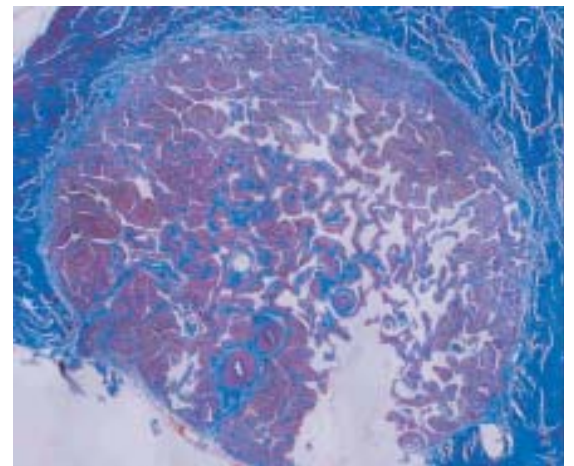


Figura 3B. Un corte microscópico del pene. Cortesía del Dr. Julio Eduardo Ferrer y colaboradores del Instituto de Ciencias de la Salud, CES, Medellín.



Figura 3C. Una visión de un pene en el microscopio electrónico (Tomado de Saenz de Tejada, et al. *Physiology of erectile function and pathophysiology of erectile dysfunction*)¹⁶.

En ambos ejemplos, geográfico de la costa o anatómico del pene, se puede asegurar que los resultados de las tres mediciones serán diferentes y que la de mayor extensión sería el tercero que tiene los mayores detalles. En realidad el resultado del último caso la extensión tiende al infinito en el marco teórico y la geometría tradicional con sus recursos nos muestra simplemente que una figura con los bordes rectos o redondeados tiene una longitud menor que otra equivalente que sea irregular, cuando lo ideal es tener una herramienta que permita representar una medición genuina de la figura irregular, con los volúmenes reales que estas estructuras ocupan en el espacio.¹

Muchas de las estructuras no-Euclidianas en la naturaleza como las ramas de los árboles, las costas escarpadas, las superficies de las montañas y sobretodo casi todas las anatómicas son en efecto estructuras fractales. Por tanto estos sistemas anatómicos en particular y los naturales en general necesitan de un algo como esta geometría especial para que puedan ser medidos adecuadamente.

Definición de los Fractales

Hablando matemáticamente puede decirse que los fractales son objetos cuya dimensión es el producto de una fórmula que usa

expresiones numéricas que son no enteras, ni fraccionarias como por ejemplo $5 + \sqrt{-2}$. Estos números llamados complejos (**C**) se componen de dos partes: Una real y otra imaginaria (**i**). La parte “real” se define como cualquier número incluido en el intervalo infinito de $[0 \text{ a } \infty]$ que incluye los números racionales (enteros positivos y negativos) y los irracionales (como el número pi o las raíces cuadradas positivas) y la parte “imaginaria” (**i**) son los números con raíces cuadradas negativas como $\sqrt{-2}$ que cuando se describieron se consideraron como números “no existentes”. La suma de las dos partes se llama número complejo.

Un objeto fractal, para serlo, debe poseer además las siguientes dos características obligatorias:

a) Autosimilitud o Auto semejanza: La condición fractal esta asociada con objetos geométricos irregulares que muestran una condición llamada *auto similaridad*. Quiere decir que las formas están compuestas por subunidades (y sub-sub-unidades hasta el infinito si se quiere) que recuerdan la estructura del objeto completo. También puede decirse que cada área de un fractal conserva de manera similar sus características globales repitiéndose los detalles periódicamente de una manera que tienden hacia al infinito; dicho de otra manera cada porción del objeto tiene las mismas características del objeto completo, manteniendo una relación de las partes con el todo. Si los modelos se idealizan, esta propiedad se cumple en todas las escalas. La autosimilitud tiene dos posibilidades: Que sea “perfectamente similar” para los fractales lineales o “Estadísticamente similar” para los fractales complejos que son los naturales como el pene en este caso.

El concepto se aplica en formas matemáticas muy comunes en la naturaleza como los cristales de hielo y en general a todo tipo de cristalización natural, que usó Helge von Koch para diseñar el tercero de los fractales más reconocidos llamado «*Snowflake Curve*», o la curva del «*Copo de nieve*» en donde una

estructura básica (Parte A de la figura 4) se repite “**n**” veces para formar la figura completa (Parte B de la figura 4). Es posible reproduciendo solamente algún punto de la figura B reproducir la totalidad de la figura. Igual la reproducción no tiene que ser simétrica o regular como la figura en la parte C, que representa lo que realmente ocurre en la naturaleza (Ver figura 4).

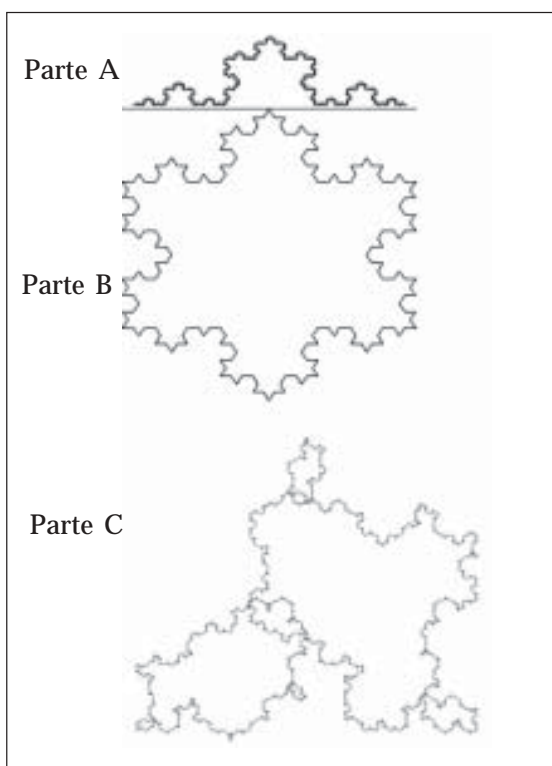


Figura 4. El “Copo de Nieve” de Fabián Helge von Koch ó “*snowflake curve*”. El tercero de los fractales más conocidos. Parte A: segmento Parte B. Segmentos unidos forma una curva simétrica. Parte C: Segmentos aleatorios forman una isla con formas diferentes, siempre repitiendo el segmento original.

¿Qué son las iteraciones?

Es repetir sobre sí misma una imagen cierta cantidad de veces. En el caso de los fractales matemáticos lo que se itera son fórmulas o ecuaciones mediante algoritmos. Por ejemplo al adentrarnos en el triángulo de Sierpinski de la figura 1 siempre encontraremos otro triángulo con las mismas características que el anterior pero a diferente escala (diferente tamaño), eso significa que está repetido infinitas veces. Igual en los fractales complejos que veremos más adelante. Se conozcan o no los números, existe una ecuación que lo itera **n** número de veces. Por supuesto la naturaleza usa esta forma de hacer tejidos mucho antes que el ingenio humano lo descubriera y es el mecanismo para los vasos sanguíneos, los bronquios o las trabéculas del pene por ejemplo (Figura 5).

b) Dimensión Fractal: La geometría fractal analiza y describe los conjuntos de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos matemáticos que reemplazan y superan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la geometría Euclidiana tradicional. Como se usan números diferentes a los naturales (es decir los previamente descritos números complejos tan difíciles de concebir por la mente), se someten a un proceso matemático “simple”, tal como elevarlos al cuadrado y sumarlos consigo mismos. Este proceso repetido o iterado suficientes veces, transforma ese número complejo “simple” en uno infinitamente intrincado. En otras palabras, cuando se tiene la ecuación (compleja) que genera un fractal, lo que se hace luego es iterarla “**n**” veces y para ello se debe elegir el número de

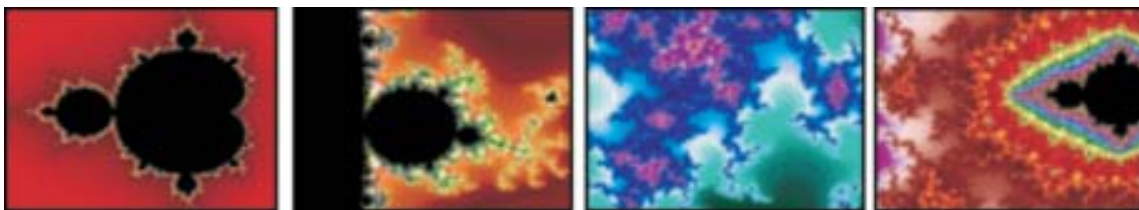


Figura 5. El conjunto de Mandelbrot que es el fractal complejo más conocido. Se muestran aproximaciones crecientes (con zoom) de la misma figura en diferentes imágenes que teóricamente puede ir hasta el infinito

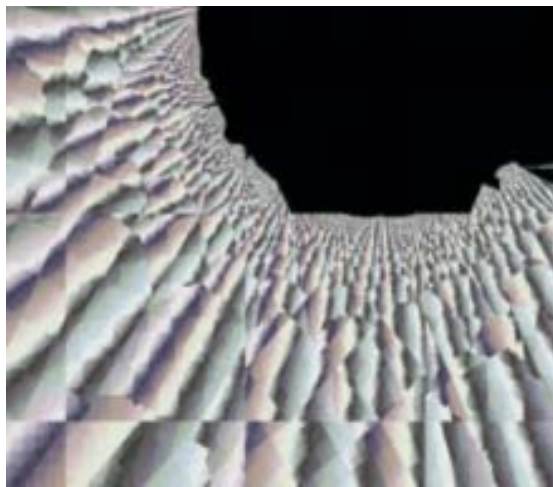


Figura 6. Fractal Artístico. Tomada de: http://www.arrakis.es/~sysifus/alchmy_c.html. Galería Summa El 3 de septiembre de 2006.



56

Figura 7. Fractal Artístico. Tomada de: http://www.arrakis.es/~sysifus/alchmy_c.html. Galería Clasic. El 3 de septiembre de 2006.

iteraciones. Como los fractales están compuestos por elementos cada vez más pequeños de sí mismos según la previa definición de **autosimilitud**, el concepto de **longitud** pasa a ser algo complejo y sin sentido y de esta manera el concepto de **dimensión** comienza a jugar un papel fundamental. Por tanto no se pregunta ¿cuánto mide un fractal?, sino ¿cuál es su dimensión?. Los fractales matemáticos perfectos y teóricos tienen un número infinito de iteraciones y detalles, generando unas imágenes llamadas “*fractales artísticos o computacionales*” con extraños paisajes

basados en esas dimensiones fraccionarias (no enteras) que tienen un sorprendente parecido con estructuras anatómicas. (Ver figuras 6 y 7).

Los distintos tipos de Fractales

Existen dos tipos bien definidos de fractales. Los **lineales** y los **no lineales**. Los **fractales lineales** se generan a través de los números naturales y algoritmos que caben en la matemática Euclídea, creándose apenas con un simple cambio en la variación de sus escalas. Ellos son exactamente idénticos hasta el infinito. Al “*sumergirse*” dentro de esos objetos siempre va a encontrar exactamente la misma estructura, por ejemplo un círculo, sin distorsiones, solo cambia su escala.

Cuando se itera una forma simple damos un primer paso para acercarnos a la geometría fractal, aunque en los modelos naturales como el pene no es tan fácil encontrar fractales lineales perfectos y simétricos, excepto tal vez en ciertos segmentos regulares de vasos, nervios u otros tejidos que pueden considerarse como lineales. Es decir serían formas Euclidianas simples (círculos o líneas) iteradas un número “n” veces. (Figura 8).

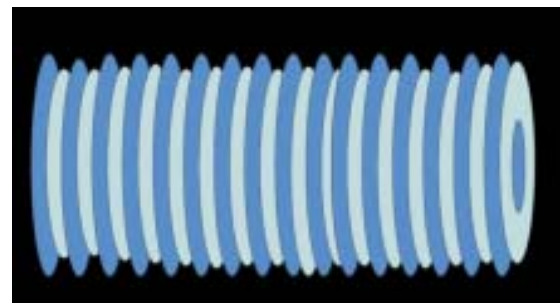


Figura 8. Un fractal simple por iteración de una figura plana.

Los fractales **no lineales**, en cambio, son aquellos que se generan a partir de números complejos. La mayoría de los objetos fractales puramente matemáticos y naturales como el pene mismo no son lineales. El ejemplo clásico de un fractal complejo matemático son conjuntos como el “*Mandelbrot*” (Ver figura

5) o el “*de Julia*” que se generan a través de iterar una cierta cantidad de veces las ecuaciones complejas. (Ver figura 9)^{1, 5, 9}

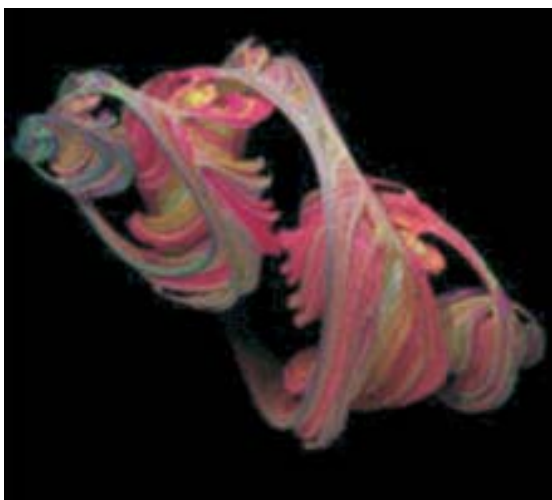


Figura 9: Conjunto de Julia tridimensional. El segundo fractal complejo más conocido.

La contribución de Mandelbrot a este tema debe valorarse adecuadamente, puesto que fue más allá de simplemente interpretar la dimensión fraccionaria de los fractales, en su trabajo lo importante fue poner de manifiesto una clase de simetría que había permanecido desapercibida para los matemáticos, aunque no para los artistas. Esta simetría consiste en descubrir que muchos objetos son similares a sí mismos aunque se cambie la escala con la cual son analizados.

Un árbol es el ejemplo cotidiano y más sencillo que podamos imaginar. Su tronco se subdivide en ramas más pequeñas y cada rama en otra rama y así sucesivamente. Sin embargo, si amplificamos suficientemente una sola rama junto con sus ramas más pequeñas, su aspecto general será la del mismo árbol. Así, podríamos decir que las partes del todo están formadas por versiones más pequeñas (Figura 10).

La naturaleza

Como ya se ha visto, existen varios sistemas que tienen características fractales, au-

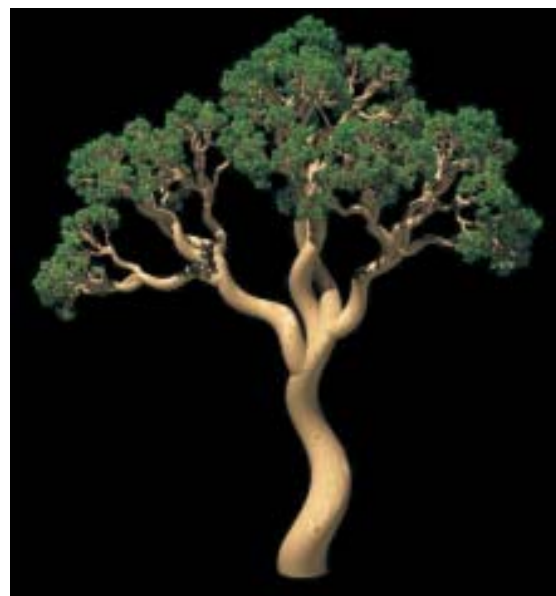


Figura 10. La mejor forma de dimensión Fractal en la naturaleza: Un árbol.

tosimilares, como los árboles, las neuronas, los vasos sanguíneos, los pilares o las trabéculas del pene.

Si vemos un vaso sanguíneo en su totalidad y luego tomamos una rama menor, ésta última tendrá características muy similares al vaso en su totalidad. En la misma rama podemos ver otras más pequeñas y dividirla en otras menores aún. Esas características transforman a un vaso sanguíneo en un objeto fractal. Pero llega un momento en que ya no hay manera de seguir descomponiendo los vasos u otras estructuras porque en el mundo real aparecen límites inferiores y superiores sobre las escalas que se aplican. Por lo tanto no se trata de fractales perfectos puesto que esos solo existen en el campo de lo teórico y no en el mundo real.

Cuando se describen los modelos de tejidos humanos que se comportan como fractales (Ej. el pene), carecemos de la ecuación de números complejos que utilizó la naturaleza e ignoramos también el número de iteraciones puesto que partimos a la inversa, es decir, tenemos la imagen compleja pero no tenemos la operación matemática. Sin embar-

go queda claro que la geometría fractal es la geometría adecuada para fabricar genes, organelas, células, tejidos, órganos y sistemas y en general cualquier estructura que necesite autorepetirse millones de veces.

Observando la similitud de los fractales artísticos de las figuras 5 y 6 con otras formas naturales entendemos intuitivamente que lo único que hace el computador es imitar la naturaleza. Por ejemplo, las fotos de objetos naturales como los cristales de sustancias se revela la verdadera dimensión de un objeto fractal y lo semejantes que son estas figuras, creadas o no por el computador, con las imágenes de la naturaleza. (Figura 11).



Figura 11. Cristales de enalapril. Una imagen fractal natural. Tomado de: www.cellsalive.com. Por: James Sullivan.

Otras estructuras anatómicas complejas muestran una disposición fractal. Los ejemplos clásicos además del árbol arterial y venoso, incluyen las ramas de ciertos haces del

músculo cardíaco, redes como el árbol traqueo-bronquial y el sistema de conducción de His-Purkinje. Estas estructuras cardiopulmonares y nerviosas autosimilares buscan cumplir con una serie de funciones fisiológicas: La más común es el transporte rápido y eficiente de sustancias (Ej. Sangre, neurotransmisores, linfa, etc.) o la adecuada distribución espacial de las redes. No es casualidad que la estructura del sistema sanguíneo de los animales, vascular de los árboles, la Internet, la red neural, la manera en la cual los ríos drenan un territorio y otros cientos de ejemplos tengan una estructura en ramificaciones similares a la de un árbol. Por tanto la dimensión fractal está relacionada en proporción directa con las necesidades de transporte (de líquidos, de información, de electricidad, etc.). A más intrincada la red, más compleja la distribución. (Ver ejemplo en la figura 12 con red neural).

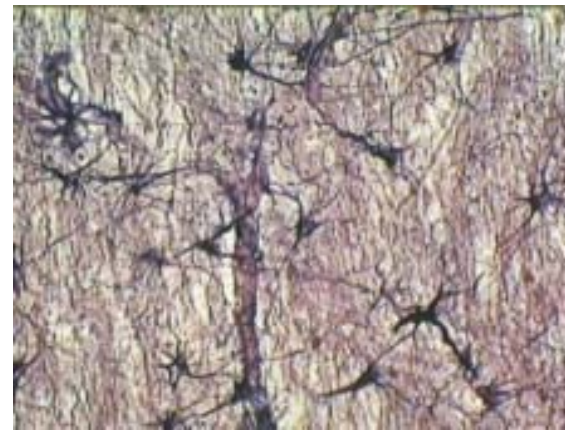


Figura 12. Una red neural. Cortesía de: Paul B. Bell, Jr. and Barbara Safiejko-Mroczka, Department of Zoology, The University of Oklahoma. Con autorización.

Una variedad de otros sistemas orgánicos contienen estructuras que se comportan como fractales para facilitar la disseminación de la información (como en el sistema nervioso), la absorción de nutrientes (como en el intestino), para facilitar la distribución o el transporte de sustancias (ductos biliares, cálices renales, plexo coroidal, vellosidades coriónicas placentarias). Con la edad y la enferme-

dad las estructuras fractales anatómicas pueden mostrar degradación en su complejidad estructural, como por ejemplo la pérdida de las ramificaciones dendríticas con la edad en las neuronas de la corteza gris del cerebro o la fibrosis de la trabécula cavernosa.^{17,18,19,20,21,22}

Si se penetra lo suficiente en cualquiera de los tejidos vivos como hueso, cartílago, músculo o neuronas siempre se encontrará una estructura o diseño fractal. Adicionalmente la manera de fabricar en serie esa microestructura de los tejidos y de las organelas celulares es igualmente una explotación de esta geometría. En otras palabras cualquier organela celular o aún más pequeño, partícula del átomo necesita de una geometría que permita su función y facilite su diseño y esta es sin duda la microestructura fractal.

El pene fractal

Según la conjetura enunciada en este capítulo, un órgano como el pene y su compleja estructura interior poseen diferentes tipos de ensamblajes fractales que explican la particular ingeniería con la que fue construido el tejido y teniendo en cuenta que posee formas desde tubulares, regulares, pasando por muchas irregulares de soporte (Figura 13).^{23,24,25}

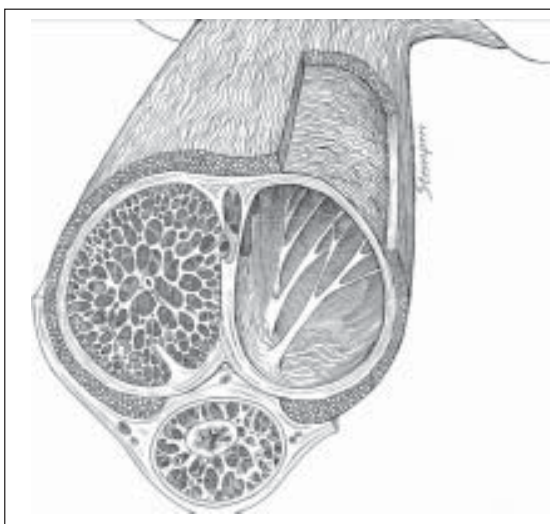


Figura 13. El pene como fuente de diferentes formas fractales. Tomado de Campbells Urology, 8va ed.

El pene está sometido por supuesto a las diferentes leyes físicas universales como la de Pascal o las de Newton que permiten su funcionamiento. Sin embargo es fundamental crear las estructuras adecuadas puesto que existe una dependencia de ellas para funcionar como órgano.

Una lista parcial de las estructuras con potencial fractal del pene podría ser la siguiente:

- Un vaso sanguíneo: Fractal simple
- La red vascular: Fractal complejo no perfecto
- Un nervio: Fractal simple
- La red neural: Fractal complejo no perfecto
- El sistema trabecular: Fractal complejo no perfecto
- El sistema de los pilares: Fractal complejo no perfecto
- El esqueleto fibroso peneano: Fractal complejo no perfecto.

Bajo la piel, el pene se encuentra cubierto por una primera capa llamada **fascia de Colles**, compuesta de tejido conectivo y algunas fibras musculares lisas. Inmediatamente por debajo de esta, se encuentra una segunda capa, llamada fascia profunda o de **Buck** que es una membrana más resistente que rodea a ambos cuerpos cavernosos. Finalmente más interna se encuentra la **túnica albugínea** formando la pared externa de los cuerpos cavernosos cubriéndolos en toda su extensión y que está compuesta de fibras elásticas que forman una delgada red irregular en la cual las fibras colágenas se apoyan.^{26,27,28}

Los cuerpos cavernosos están soportados por un esqueleto fibroso que incluye además de la túnica albugínea, el septo intercavernoso, los pilares intracavernosos, la red fibrosa intracavernosa y finalmente las vainas fibrosas periarteriales y perineurales. Autores como Bitsch (1990) creen que la red intracavernosa y las vainas son en realidad un re-

fuerzo adicional a la túnica albugínea. La túnica que cubre los cuerpos cavernosos es una doble estructura con múltiples subcapas permitiéndole gran flexibilidad, rigidez y fuerza a los tejidos del pene.^{29,30,31,32}

Las fibras de la **capa interna** de la túnica soportan y contienen el tejido cavernoso y están orientadas circularmente. Anclados en forma radiada desde la capa interna están los **pilares intracavernosos** que actúan como puntales, reforzando el **septo intercavernoso** y proveyendo el soporte esencial al tejido eréctil. (Figura 14).^{25,33}

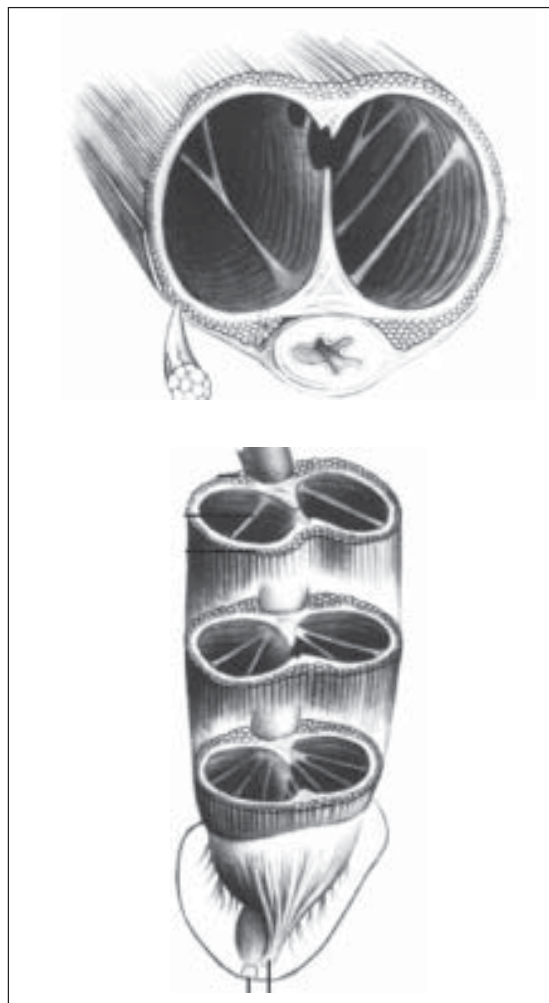


Figura 14. Pilares intracavernosos en el citoesqueleto del pene según esquema del Tomado de: Geng-Long Hsu , Asian J Androl 2006; 8 (2): 225-234

El septo entre los dos cuerpos cavernosos que completa el esqueleto es incompleto en los humanos pero es completo en otras especies como el perro. Sin embargo desconocemos por falta de estudios adecuados cual puede ser la relación o secuencia (fractal) que existe entre las soluciones que ha encontrado la naturaleza para proveer rigidez en las diferentes especies de animales.^{34,35}

En el pene de los humanos, los pilares intracavernosos, más numerosos hacia la parte distal del pene formarían si se pusieran en secuencia una estructura fractal simple cuya distribución y configuración es ideal para asumir la presión axial que se genera sobre el pene erecto, máxime cuando se entiende que en los humanos la erección y la rigidez dependen exclusivamente del llenamiento de sangre al no existir estructuras óseas o cartilagosas que colaboren en la erección. Si descomponemos la forma que adopta una secuencia imaginaria de pilares en el pene obtendremos una forma como la de la figura 15. (Figura 15).^{36,37,38,39}



Figura 15. El triángulo formado entre los pilares y el septo intracavernosos iterados formando un tipo de fractal simple.

El diseño de una forma de fractal continuo no compleja se puede ampliar para explicar la totalidad de la estructura tubular del pene. Analizando su geometría, aún en una de las estructuras mas simples como son los pilares intracavernosos existen formas con características fractales que se reforzaría aun mas si se analiza el diseño del sistema de trabéculas, la red neural o incluso el sistema de arterias peneanas. (Ver figura 16)^{31, 32, 33, 34}

Las fibras de la **capa externa** de la túnica albugínea, están orientadas longitudinalmen-

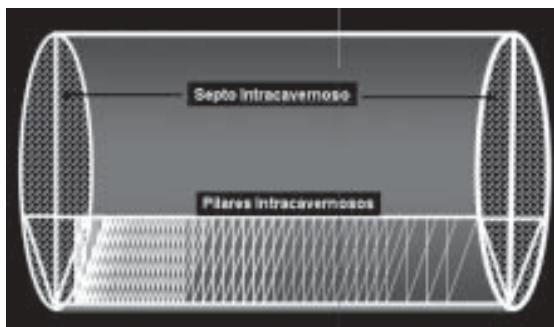


Figura 16. Esquema adicional del triángulo formado entre los pilares intracavernosos y el tabique intercavernoso iterado formando un fractal simple.

te, extendiéndose desde el glande peneano hasta las cruras; para insertarse en la rama inferior del pubis. Pero, considerando el pene una esfera de reloj están ausentes entre la posición de las 5 hasta las 7 puesto que el cuerpo esponjoso aunque tiene una estructura similar al cuerpo cavernoso con sinusoides más grandes, tiene una túnica más delgada que carece de capa externa o de puntuales intracorpóreos que están totalmente ausentes en el glande. De esta manera se comporta como una estructura de baja presión durante la erección que sirve además como un capuchón protector de la punta de lanza en que se convierten los cuerpos cavernosos, amortiguando el dolor que se pudiera producir en cualquiera de los miembros de la pareja.^{31, 32, 33, 34,40}

La naturaleza fibrosa de la túnica en general, le permite cierta distensión, pero alcanzando rápidamente su límite máximo de expansión, lo que hace posible conseguir la rigidez peneana. Las capas externas de la túnica parecen tener un rol adicional en la compresión de las venas emisarias durante la erección.⁴¹

Las venas emisarias van entre las capas interna y externa de la túnica por cortas distancias, perforando frecuentemente las fibras externas en forma oblicua. Las arterias cavernosas y la dorsal del cuerpo cavernoso toman una ruta más directa que las venas y están rodeadas por una vaina de tejido pe-

riarterial blando que las protege de la oclusión por la túnica albugínea durante la erección.^{42,43}

El tejido eréctil, es comparable a una esponja, formada por numerosas trabéculas de distribución irregular, compuestas por escaso tejido conjuntivo y gran abundancia de células musculares lisas, que limitan los espacios lacunares revestidos interiormente por endotelio vascular y con gran cantidad de terminaciones nerviosas del sistema nervioso autónomo adrenérgicas/colinérgicas y fibras del sistema NANC (no adrenérgicas, no colinérgicas). En el hombre de edad disminuye la cantidad de tejido muscular liso, estableciéndose un predominio de tejido conjuntivo, lo que causa alteración en la erección (desorganización del sistema), siendo la erección el producto esperado del sistema eréctil.^{44,45}

La **rigidez peneana** puede definirse como la habilidad del pene erecto para vencer las fuerzas axiales de la vagina durante la penetración, ocurre después que se den secuencialmente los pasos de relajación del músculo liso, aumento del flujo arterial entrante y restricción del flujo venoso saliente del pene.

La **“rigidez axial”** primero y luego la “deformación radial peneana”, son los parámetros físicos que definen objetivamente la capacidad del pene erecto de resistirse a la deformación de las fuerzas compresivas de la vagina durante la penetración.^{37,38}

La calidad de la rigidez peneana esta relacionada directamente con tres factores que la afectan: La presión intracavernosa, las propiedades mecánicas del tejido y la geometría del pene. Ellas se relacionan con la capacidad del pene de resistir las temidas **fuerzas de bucle** que a su vez pueden definirse como *“la magnitud de la fuerza compresiva axial aplicada sobre el glande del pene que produce una curvatura pronunciada en el cuerpo del pene, de tal que alguna pequeña fuerza adicional podría provocar un colapso”*. Estas serían las fuerzas capaces de provocar una fractura del pene.^{37,38}

Se ha propuesto que en hombres normales la presión intracavernosa es de 90-130

mmHg durante la erección y que puede llegar hasta 300-400 mmHg con la contracción de los músculos perineales. También se ha demostrado que el tercio externo de la vagina tiene una presión de aproximadamente 40mmHg y los dos tercios internos tienen una presión de cierre de unos 100 mmHg. Una resistencia a doblarse de 550 gramos que equivale aproximadamente a una presión de 100mmHg es considerada la mínima para la penetración vaginal, que es la calidad de rigidez que debe conseguirse con el llenado de sangre.^{46,47}

Con respecto a las propiedades mecánicas del tejido y a la geometría del pene se encuentran al menos tres factores involucrados: *La expansibilidad del tejido cavernoso, la distensibilidad de la túnica albugínea y la relación del aspecto del pene con el diámetro del pene flácido.*

La “expansividad” es una medida de todo el cuerpo cavernoso a ocupar un volumen máximo con una presión intracavernosa relativamente baja; refleja entre otras cosas el porcentaje de tejido que no es fibrótico. La “distensibilidad” de la túnica es la relación entre el volumen relativo del pene totalmente erecto y el volumen del pene flácido y representa una medida de las propiedades mecánicas de elasticidad de la túnica. La “relación del aspecto del pene” se refiere a la relación que existe entre el diámetro peneano y la longitud del pene flácido.

En última instancia la naturaleza busca que la geometría del pene sea capaz de alcanzar, mantener y resistir las fuerzas que se desatan durante la relación sexual para usar el pene erecto como una punta de lanza que penetra en la vagina.

Por tanto es fundamental la forma como se construye la estructura que no es otra que la geometría fractal. En la figura 18 puede observarse en visión real la distribución de los pilares intracavernosos en una fotografía suministrada por el Dr. Hsu que confirma que de una visión real de la posición de estas estructuras de soporte. (Figura 17).⁴⁸



Figura 17. Pilares intracavernosos foto del cortesía del Dr Geng-Long Hsu, M.D., Microsurgical Potency Reconstruction and Research Center, Taiwan Adventist Hospital. Con autorización.

Podría decirse como complemento de la presente conjetura que la lógica indica que la estructura fractal se hace más compleja a medida que evoluciona el pene en las diferentes especies. En la evolución natural el pene óseo u “*os penis*” evoluciona muy posiblemente al pene vascular complicando amplificando la estructura fractal. Esta observación es fruto de un trabajo que está en curso comparando el pene de diferentes mamíferos. (Figura 18).

Se puede conjeturar además que el pene ha usado la modificación de la estructura fractal con los siguientes objetivos:

- a) Como una forma de evolución de las estructuras de soporte del pene.
- b) En la búsqueda de las formas más adecuadas de conseguir rigidez peneana
- c) Una manera de ser más efectivo en mantener la «fuerza axial»
- d) En general, como una forma más efectiva de lograr la función del sistema eréctil

Usos potenciales hacia el futuro de los fractales en el pene:

- a) Lectura de placas de histología y patología:** Interpretar el patrón de la estructura normal facilita identificar los hallazgos anormales



Figura 18. Comparación entre una imagen de un pene humano (izq) y un pene canino (der). *Imagen izquierda cortesía del Dr Geng-Long Hsu, M.D., Microsurgical Potency Reconstruction and Research Center, Taiwan Adventist Hospital. Con autorización.*

- b) Diseño de prótesis vivas:** En el futuro el uso de la terapia génica acudirá al diseño de prótesis de tejido para implantar en el pene. El diseño semejando estructuras fractales las hará más funcionales
- c) Priapismo:** Una parte de la fisiopatología de la erección prolongada puede tener una base fisiopatológica en la estructura del pene que comprime las venas indefinidamente y mantiene el sistema eréctil en una función que tiende al infinito.
- d) Enfermedad de Peyronie:** La enfermedad implica la comprensión que las microfisuras en la albugínea peneana son parte de la fisiopatología. Los tratamientos que intentan restablecer la estructura peneana será sin duda más efectivos si toman en cuenta el diseño original del pene.
- e) Estudio de las fracturas de pene:** Una de las aplicaciones más interesantes de los fractales es en el comportamiento de estructuras sólidas frente a las fracturas. Esto implica desde fracturas de la corteza terrestre y terremotos hasta fracturas óseas y de cualquier tejido.⁴⁹
- f) Terapia génica e ingeniería tisular:** El objetivo es “fractalizar estructuras”, ensamblar repetidos que es la forma usada por la naturaleza para crear los tejidos.⁵⁰
- g) Nanotecnologías:** Si la ultraestructura de los tejidos como el pene es un diseño fractal, cualquier aditamento o modificación de esa estructura que se utilice en el futuro debe cumplir con los postulados de la geometría fractal.^{46,51}
- h) Relación con la teoría del Caos:** Quizás lo más importante de vincular los fractales con la estructura del pene (el órgano) es dar paso a la interpretación de su función como un sistema (sistema eréctil) y aplicar concomitantemente las teorías matemáticas de desorganización y caos a la disfunción del sistema. Se puede anticipar la alteración del sistema expresada en modelos matemáticos. La explicación de ese fenómeno será el objetivo de la segunda entrega de este artículo.

Conclusiones:

1. El pene es una estructura compleja que no es posible describir o medir parcial,

ni globalmente mediante la geometría Euclidiana tradicional.

2. La estructura del pene posee alguna clase de autosemejanza, posiblemente estadística, por medio de algoritmos, lo que constituye la base de la geometría fractal.
3. Desconocemos la escala que genera las formas del pene, pero sin duda corresponde a un algoritmo que se expresa matemáticamente como un número complejo.
4. En conjunto el pene es por tanto una estructura que cumple los postulados para ser considerada fractal natural.
5. Aunque sea lógico pensar desde el punto de vista matemático que la naturaleza utiliza una geometría fractal para crear las diferentes estructuras peneanas, la aplicación práctica de estas observaciones necesita de estudios adicionales.

Bibliografía

1. <http://www.quanta.net.py/zfractal/mainmenu.htm>. Consultada el 15 de enero de 2007.
2. <http://www.arrakis.es/~sysifus/>. Consultada el 15 de enero de 2007
3. <http://www.math.yale.edu/users/mandelbrot/>. Consultada el 15 de enero de 2007.
4. Mandelbrot, Benoît B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York: W. H. Freeman and Co., 1982. ISBN 0-7167-1186-9
5. <http://coco.ccu.uniovi.es/geofractal/>. Consultada el 17 de noviembre de 2006
6. http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/147/htm/sec_5.htm Consultada el 17 de enero 2007.
7. Barnsley, Michael F., and Hawley Rising. *Fractals Everywhere*. Boston: Academic Press Professional, 1993. ISBN 0-12-079061-0
8. Mandelbrot, Benoît B. *Los Objectos Fractales: forma, azar y dimensión*. Spanish translation of *Les objets fractals*. Barcelona: Tusquets Editores, 1993, 213 pp.
9. Ary L. Goldberger, Luis A. N. Amaral, Jeffrey M. Hausdorff, Plamen Ch. Ivanov, C.-K. Peng*, and H. Eugene Stanley. Fractal dynamics in physiology: Alterations with disease and aging. PNAS | February 19, 2002 | vol. 99 | Suppl. 1 | 2466-2472
10. Winfree, A. T. (1994) *Nature (London)* **371**, 233-236
11. West, G. B., Brown, J. H. & Enquist, B. J. (1999) *Science* **284**, 1677-1679
12. Barnsley, Michael F., and Hawley Rising. *Fractals Everywhere*. Boston: Academic Press Professional, 1993. ISBN 0-12-079061-0
13. Falconer, Kenneth. *Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications*. West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd., 2003. ISBN 0-470- 84861-8
14. Peitgen, Heinz-Otto, and Dietmar Saupe, eds. *The Science of Fractal Images*. New York: Springer-Verlag, 1988. ISBN 0-387-96608-0
15. Falconer, Kenneth. *Techniques in Fractal Geometry*. John Wiley and Sons, 1997. ISBN 0-471-92287-0
16. Saenz de Tejada I, et al. *Physiology of erectile function and pathophysiology of erectile dysfunction. Chapter 10, 287*.
17. Bassingthwaighte, J. B., Liebovitch, L. S. & West, B.J., (1994) *Fractal Physiology* (Oxford Univ. Press, New York).
18. Glass, L. & Mackey, M. C., (1988) *From Clocks to Chaos: the Rhythms of Life* (Princeton Univ. Press, Princeton).
19. Peng, CK, Hausdorff, JM y Goldberger, AL (2000) in *Nonlinear Dynamics, Self-Organization, and Biomedicine*, ed. Walleczek, J. (Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.), pp. 66-96. www.physionet.org/tutorials/fmnc/
20. Erdogruo T, Savas M, Yilmaz N, Baykara M: Are normal hemodynamic responses invariability associated with normal penile rigidity and potency?. *International Journal of Impotence Research* 2001; 13:10-15.
21. Goldbeter, A., (1996) *Biomedical Oscillations and Cellular Rhythms: The Molecular Basis of Periodic and Chaotic Behavior* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.).
22. Rodríguez, Javier, Álvarez, Luisa F, Marino, Martha E et al. Variabilidad de la dimensión fractal del árbol coronario izquierdo en pacientes con enfermedad arterial oclusiva severa. *Rev. Colomb. Cardiol.*, July/Aug. 2004, vol.11, no.4, p.185-192. ISSN 0120-5633.
23. Lue, Tom. Physiology of penile erection and pathophysiology of erectile dysfunction and priapism. In Walsh, P, Retik A, Darracott E, Wein A. *Campbell's Urology*. 8a ed. Saunders, Philadelphia, London, New York, St Louis, Sydney, Toronto, 2002. pp 1589-1613.
24. Putz R, Pabsteds R. Pelvic diaphragm [floor]: Male and female external genitalia. In: Putz R, Pabsteds R, eds. *Sobotta Atlas of Human Anatomy*. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2001: 222-239.
25. Lacono F, Barra S, Dirosa G, Boscaino A, Lotti T. Microstructural disorders of tunica albuginea in patients affected by impotence. *Eur Urol* 1994; 26: 233-9.
26. Mundy AR, Healy JC. Muscles and fasciae of the perineum: true pelvis, pelvic floor and perineum. In: Standring S. ed. *Gray's Anatomy*. 39th ed. London: Elsevier Churchill Livingstone; 2005. p1365-71.
27. Claes H, Bijmens B, Baert L. The hemodynamic influence of the ischiocavernosus muscles on erectile function. *J Urol*. 1996;156:986-990.
28. Brock G, Hsu GL, Nunes L, von Heyden B, Lue TF. The anatomy of the tunica albuginea in the normal penis and Peyronie's disease. *J Urol*. 1997;157:276-281.

29. Hsu GL, Brock G, Martinez-Pineiro L, et al: The three-dimensional structure of the human tunica albuginea: Anatomical and ultrastructural levels. *Int J Impot Res* 1992; 4:117-129.
30. Hsu GL, Brock G, Martinez-Pineiro L, et al: Anatomy and strength of the tunica albuginea: its relevance to penile prosthesis extrusion. *J Urol* 1994;151:1205-1208.
31. Goldstein AMB, Padma-Nathan H: The microarchitecture of the intracavernosal smooth muscle and the cavernosal fibrous skeleton. *J Urol* 1990;144:1145-1146.
32. Wespes E, Nogueira MC, Herbaut AG, Caufriez M, Schulman CC. Role of the bulbocavernosus muscles on the mechanism of human erection. *Eur Urol*. 1990;18:45-48.
33. Hsu, Geng Lou. Hypothesis of human penile anatomy, erection hemodynamics and their clinical applications. *Asian J Androl* 2006; 8 (2): 225-234
34. Schmidt MH, Schmidt HS. The ischiocavernosus and bulbospongiosus muscles in mammalian penile rigidity. *Sleep*. 1993;16:171-183.
35. Hsu GL, Hsieh CH, Wen HS, et al, Anatomy of the Human Penis: The Relationship of the Architecture Between Skeletal and Smooth Muscles. *Journal of Andrology*, Vol. 25, No.3, May/June 2004.
36. Bitsch M, Kromann-Andersen B, Schou J, Sjøtoft E. The elasticity and the tensile strength of tunica albuginea of corpora cavernosa. *J Urol* 1990; 194: 642-644
37. Basar MM, Atan A, Tekdogan UY. New concepts parameters of Rigiscan in differentiation of vascular erectile dysfunction: Is it a useful test?. *International Journal of Urology* 2001;8:686-691.
38. Adaikan PG, Ratnam SS: Pharmacology of penile erection in humans. *Cardiovascular Intervent Radiol* 1988;11:191-194.
39. Andersson K-E, Wagner G: Physiology of penile erection. *Physiol Rev* 1995;75:191-236.
40. Hsieh CH, Wang CJ, Hsu GL, Chen SC, Ling PY, Wang T, et al. Penile veins play a pivotal role in erection: the hemodynamic evidence. *Int J Androl* 2005; 28: 88-92.
41. Chen SC, Hsieh CH, Hsu GL, Wang CJ, Wen HS, Ling PY, et al. The progression of the penile vein: could it be recurrent? *J Androl* 2005; 26: 53-60.
42. Hsu, GL, Hsieh CH, Wen HS, Hsu WL, Chen YC, Chen RM, et al. The effect of electrocoagulation on the sinuoids in the human penis. *J Androl* 2004; 25: 954-9.
43. Nehra A, Goldstein I, Pabby A, Nugent M, Huang YH, de las Morenas A, et al. Mechanism of venous leakage: a prospective clinico pathological correlation of corporeal function and structure. *J Urol* 1996; 156: 1320-9.
44. Nehra A, Azadzi KM, Moreland RB, et al: Cavernosal expandability is an erectile tissue mechanical property which predicts trabecular histology in an animal model of vasculogenic erectile dysfunction. *J Urol* 1998; 159: 2229-2236.
45. Zhou-Jun SHEN, Xiao-Dong JIN, Zhao-Dian CHEN, Yuan-He SH Effect of aging on penile ultrastructure Department of Urology, First Affiliated Hospital, Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310003, China *Asian J Androl* 2001 Dec; 3: 281-284.
46. Udelson D, Park K, et al. Axial penile buckling forces vs Rigiscan® radial rigidity as a function of intracavernosal pressure: why rigiscan does not predict functional erections in individual patients. *Int J Imp Res* 1999;11:327-339.
47. Erdogruo T, Savas M, Yilmaz N, Baykara M: Are normal hemodynamic responses invariability associated with normal penile rigidity and potency?. *International Journal of Impotence Research* 2001; 13:10-15.
48. Hsu GL, Lin CW, Hsieh CH, Hsieh JT, Chen SH Distal Ligament in Human Glans: A comparative Study of Penile Architecture. *Journal of Andrology*, Vol. 26, No. 5, September/October 2005.
49. <http://www.geometriafractal.com/img/articles/articlefractalesygeologia.htm>. Consultado el 15 de enero de 2007.
50. Hsu GL, Hsieh CH, Wen HS, Chiang HS. Penile venous anatomy: application to surgery for erectile disturbance. *Asian J Androl* 2002; 4: 61-6.
51. Martínez, M. Teoría Biocognitiva: Hacia Una Ciencia de Bioinformación. Segundo Congreso Virtual de Psiquiatría, Interpsiquis 2001. Mesa Redonda: Psicósomática, 1 Febrero - 7 Marzo, 2001.