

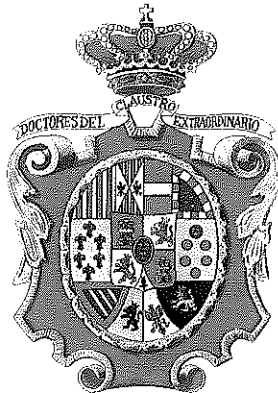
REAL ACADEMIA DE DOCTORES DE ESPAÑA

TENSEGRIDAD
ARQUITECTURA, ARTE, BIOLOGÍA

DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU
RECEPCIÓN COMO ACADÉMICO DE NÚMERO POR EL
EXCMO. SR. DOCTOR PEDRO GARCÍA BARRENO

Y CONTESTACIÓN DE LA
EXCMA. SRA. DOCTORA MARÍA CASCALES ANGOSTO

EL DÍA 13 DE ABRIL DE 2005



MADRID
MMV

Depósito legal: M. 14.622-2005
Imprime: REALIGRAF, S. A.
C/ Pedro Tezano, 26
28039 Madrid

A Iván
A Nadia

REAL ACADEMIA DE DOCTORES DE ESPAÑA

DISCURSO DEL DOCTOR

PEDRO GARCÍA BARRENO

*Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores
Doctoras Académicas; Doctores Académicos.
Señoras y Señores:*

Al tener la alta honra y grata satisfacción de penetrar en este recinto y de comparecer ante la ilustre Real Academia de Doctores, donde ocupan merecido asiento tantas y tan esclarecidas personalidades llenas de saber y en presencia de un público respetable que favorece esta recepción con su asistencia, no puedo menos de reconocer mi poquedad para ocupar debidamente este elevado y honorífico sitio; pero la condescendencia que os distingue hace vencer el temor de que me hallo asaltado y poseído por el respeto que este acto y reunión me inspiran. Solo a vuestra bondad debo mi presencia hoy y aquí, por lo cual deseo manifestar a la sabia Corporación que hoy benigna me acoge en su seno, el sentimiento de mi más profundo reconocimiento. Ofrezco por mi parte el concurso de mi más decidida voluntad para unirme con todas mis fuerzas a vuestros fructíferos trabajos.

Doctores Académicos, reciban el testimonio de mi más profunda gratitud y sincero afecto por vuestra confianza, que no se hubiera siquiera planteado a no ser por la innata generosidad de María Cascales Angosto, de Antonio Bascones Martínez y de Alberto Portera Sánchez quienes, como Académica y Académicos de Número de esta Real Academia, suscribieron la propuesta reglamentaria de mi candidatura. Doctora Cascales, Doctores Bascones y Portera, gracias.

Permitidme también confesar lo abrumador y exigente que es el ejemplo del Académico fallecido, cuyo vacío me habéis llamado a ocupar, el Doctor Dalmacio Sánchez Brezmes cuya vida profesional estuvo ligada al implantación de la «nueva» sanidad española. En la Ley de Bases de Sanidad, de 1944, se sancionan dos procesos paralelos: potenciación de los servicios sanitarios periféricos de la admi-

nistración central, y asunción progresiva por el Estado de la financiación de la Sanidad rural. El máximo órgano sigue siendo la Dirección General de Sanidad —creada en la Ley General de Sanidad de 1855— dependiente del Ministerio de la Gobernación, que vertebrará alrededor de sí a las profesiones sanitarias establecidas: medicina, farmacia y veterinaria. La Ley de Bases encomendó a las Diputaciones Provinciales el establecimiento de los servicios hospitalarios, de asistencia infantil, maternal y psiquiátrica. Las funciones sanitarias del Estado se entendían sólo por el lado preventivo y la responsabilidad de las autoridades provinciales permanecía independiente. La Ley de 1944 era una simple ley de principios sin casi regulaciones —aunque refundió en un solo texto la sucesión inabarcable de normas que regían la sanidad española— y con tres cometidos prioritarios: control epidemiológico, enseñanza sanitaria e investigación científica. Esta última, dependiente de la Escuela Nacional de Sanidad, se realizaría de acuerdo con el Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Por su parte, los ocho millones de asegurados iniciales del Seguro Obligatorio de Enfermedad —el factor de renovación sanitaria más influyente de la postguerra civil española—, implantado en 1942, situaron en poco tiempo a la Caja Nacional del Seguro de Enfermedad en condiciones de mover un enorme presupuesto. Los estudios previos a la puesta en marcha del Seguro mostraron que no había en el país suficientes dispensarios y hospitales para la asistencia pretendida. A partir del análisis de la situación por una comisión interministerial y multiprofesional creada al efecto, el Instituto Nacional de Previsión (INP) comenzó la preparación del Plan Nacional de Instalaciones Sanitarias que, publicado en 1944, fue aprobado por el Ministerio de Trabajo —había incorporado al INP en el año 1920— al año siguiente: una red de instalaciones de nueva planta que contemplaba 86 residencias, 149 ambulatorios completos y 110 ambulatorios reducidos. En total se dotaría al sistema nacional de salud 16000 camas.

En esos años, el Doctor Dalmacio Sánchez Brezmes, quién ocupó la Medalla número 44, adscrita a la Sección cuarta, de Medicina, de esta Docta Corporación, desde 1975 hasta su muerte acaecida en 2002, acudía al Hospital de San Carlos como alumno interno en la Cátedra de Don Julián de la Villa. El Doctor Sánchez Brezmes nació el día uno de febrero de 1919. Obtuvo el título de Bachiller en febre-

ro de 1936. Concluyó la Carrera Oficial de Practicante en septiembre de 1939 e, inmediatamente, inició los estudios de la Licenciatura en Medicina, avalado por Santiago Cifuentes Langa y Manuel Maroto, en la Universidad Central. Su expediente académico apunta su interés hacia las ciencias morfológicas y hacia la Cirugía, asignaturas en la que obtiene la máxima calificación; es más, cursando el segundo año de Anatomía es galardonado con el premio Martínez Molina. Tras un breve paréntesis, en el que por motivos de mudanza familiar traslada su expediente a la Universidad de Salamanca durante el Curso Académico 1942-43, concluye sus estudios de licenciatura en la Universidad de partida en 1946, habiendo sido durante los últimos años Alumno interno por oposición, situación que prolongaría hasta la obtención del Grado de licenciado (febrero 1944-septiembre 1947).

Poco antes, los Jefes de los servicios de hospitales, ingeniería y arquitectura de la Dirección General de Sanidad —Juan Pedro de la Cámara, Federico Shaw y Eduardo de Garay— realizaron, por encargo del Instituto Nacional de Previsión, un viaje para conocer los principales complejos hospitalarios de EE.UU. que luego servirían de modelo a las primeras residencias sanitarias del Seguro de Enfermedad. E inmediatamente después, el Seguro de Enfermedad convocó un concurso entre los arquitectos españoles para la redacción de anteproyectos de Residencia sanitaria y de ambulatorio completo. Los trabajos fueron expuestos en el Círculo de Bellas Artes en noviembre de 1946. Resultado de aquella primera etapa del Plan fue la construcción de cuatro residencias de más de quinientas camas: Barcelona, Bilbao, Sevilla y Zaragoza. Por aquellas fechas, Sánchez Brezmes, obtiene el Grado de Licenciado —julio de 1947—, siendo el Profesor José María Corral el presidente del tribunal examinador. El día nueve de diciembre de 1948 defiende su Tesis doctoral ante el tribunal que presidía el Profesor Julián de la Villa, obteniendo la calificación de Sobresaliente.

La vinculación docente del Doctor Sánchez Brezmes fue patente: Ayudante de clases prácticas en su primera Carrera, Practicante (1946-7 a 1955-6); Ayudante de Laboratorio en el Departamento de Cirugía (1948-9); Profesor ayudante de Anatomía (1955-6) y Profesor adjunto de Anatomía (1953-4). Frecuenta el Hospital Militar Gómez Ulla, donde trabaja con López Durán; San Carlos, en el que coincide con nuestro compañero Amador Schüller y asiste a la Uni-

versidad de Heilderberg. Se casa con Doña Francisca Bellido, enfermera, e inicia una etapa de oposiciones: diplomado en Sanidad e Inspector médico de la Seguridad Social, forense, ...

Hacia el año 1960, el Departamento de proyectos del Instituto Nacional de Previsión presentó un nuevo proyecto teórico de hospital que se incorporó a las residencias sanitarias de Castellón, Santander y Segovia. Pero la nueva andadura en el terreno sanitario de nuestro País se inicia en 1964; la celebración de *25 años de Paz* tiene un exponente distintivo en la Residencia Sanitaria madrileña de La Paz. Para la dirección del Centro de rehabilitación y traumatología del complejo sanitario, que se inaugura en diciembre de aquel año, se busca al Doctor Sánchez Brezmes, quién asumiría la responsabilidad de su gestión hasta bien entrada la década de 1970, cuando continuó su labor en el Instituto Nacional de Toxicología. El Doctor Sánchez Brezmes obtuvo los títulos de Médico Especialista en las diferentes disciplinas en las que había intervenido: Medicina de la Educación Física y el Deporte (23-marzo-1969); Rehabilitación (31-enero-1970); Medicina del Trabajo (10-septiembre-1970), y Traumatología y Ortopedia (17-marzo-1971).

El día dieciocho de febrero de 1975 leía su Discurso de recepción en esta casa. «Drogas y Drogadictos» fue el tema elegido y al que contestó el Doctor José María Barajas y García-Ansorena. Ruego que acepten mis palabras de homenaje con que veneramos la memoria del Doctor Sánchez Brezmes, la de una vida de trabajo y de bien.

Doctores, comprenderán que ante todo es mi deseo agradecerles el honor que me hacen; y les ruego que crean que mi agradecimiento, no por ser ritual es menos auténtico. También me abruman las deudas. «Cuando ya esté tranquilo, habré aprendido a ver muy de otro modo la luna y la vespertina aparición de la luna. Porque la tendré de colaboradora y no de tentadora. Y, por otra parte, también al sol tendré de colaborador. Nela, Alberto, Ricardo, Marta, Blancas, Pedro: nombres. Ya sabéis que de todos los dones que decía Jenofonte que compramos a los dioses con el trabajo es, en el mercado de los valores humanos, uno de los más costosos el del nombre, si es de buena ley. Pero las estrellas son demasiadas. La imposibilidad de enumeración, en el caso de las estrellas, me turbaría. Así, para esta fecha, habré escogido unas pocas —Elvira, Gerardo, José Manuel,

Margarita—; y sólo me acordaré de ellas —Alberto, Alfonsos, Alfredo, Amador, Ángel, Antonio, Carmen, Eladio, Felipe, Francisco, Juanes, Manuel, Marcelino, María, Pedros, Rafael, Ricardo—; sin hacer caso de las demás. Sin hacer caso de los guiños y de las sonrisas de tanta estrella como hay; cuando ya esté tranquilo».

Contando con vuestra benévola indulgencia me presento por primera vez a dirigiros la palabra en cumplimiento del primer deber que me imponen los Estatutos, obligándome a dirigir mi voz en este acto solemne a tan eminente Corporación. El tema de mi disertación —cuya elección no ha sido trivial*— discurrirá por los vericuetos de la tensegridad. «**Tensegridad: arquitectura, arte, biología**» es el título de mi Discurso de ingreso en esta docta Institución.

* Accedí a *Tensegridad* en 1990, en la *Kenneth Snelson Exhibition*, que tuvo lugar en *The National Academy of Sciences*, Washington D. C.; luego, con la lectura de las publicaciones de Donald E. Ingber (*Cellular Tensegrity... J. Cell Sci.* 1993; 104:613-627). El Prof. Ricardo Aroca, entonces Director de la E. T. S. Arquitectura de la U. P. M. y el Ing. Horacio C. Reggini, de la Academia de Ciencias Argentina, me desvelaron el mundo de los poliedros y las estructuras tensegridales; y de la mano de mi entrañable amigo Miguel de Guzmán (q. e. d.), Catedrático de Análisis Matemático de la Facultad de Matemáticas Complutense, me acerqué a las matemáticas que lo soportan.

TENSEGRIDAD

ARQUITECTURA, ARTE, BIOLOGÍA

El mundo es una armonía de tensiones.

Heráclito de Éfeso

Introducción: *tensiones*.

Tensegridad: *orígenes*.

Tensegridad: *los protagonistas* – Richard Buckminster Fuller y Kenneth B Snelson.

Tensegridad: *actores de reparto* – Alexander Calder y David Georges Emmerich.

Tensegridad: *matemáticas*.

Tensegridad: *ampliación*.

Tensegridad: *la arquitectura de la vida*.

Biotensegridad: *teoría y datos experimentales*.

Biotensegridad: *¿un nuevo paradigma?*

Biotensegridad: *el soporte bioquímico*.

Resumen.

Bibliografía.

Introducción: *tensiones*

Los avances en las artes y en las ciencias son, a menudo, el resultado de interacciones sinérgicas y de relaciones simbióticas entre unos pocos individuos. Quizás, el ejemplo más paradigmático en las artes es la sinergia y simbiosis desarrolladas durante cincuenta años entre Henri Matisse y Pablo Picasso (GOLDSTEIN 2002). Ninguna otra pareja tuvo una influencia mayor en el arte que ellos. En los periodos iniciales de sus carreras sus estilos fueron completamente diferentes. Matisse fue el maestro del color y de las formas decorativas planas, que utilizaba en imágenes realistas, serenas y amables. Picasso fue el maestro de las líneas y de los ángulos, que utilizaba

en imágenes fragmentadas impregnadas de turbulencia y emoción (FIGURA 1) *.

En Ciencia, como en Arte, la colaboración ha sido, es, una enriquecedora realidad: Leonor Michaelis y Maud L. Menten en cinética enzimática, Françoise Jacob y Jacques-Lucien Monod en regulación génica, Rita Levi-Montalcini y Stanley Cohen en factores de crecimiento celular o el paradigmático dúo James D. Watson-Francis C. Crick. Esta última, colaboración intensa por la magnitud del resultado —la estructura en doble hélice del ADN— y la brevedad de la interacción— apenas dos años (FIGURA 2). Simbiosis y sinergia; motivacio-



FIGURA 2. **François Jacob** (n 1920) y **Jacques Monod** (1910-1976): Premio Nobel de Fisiología o Medicina (PNFoM) 1965, por sus descubrimientos relacionados con el control genético de la síntesis enzimática. **Leonor Michaelis** (1875-1949) y **Maud L. Menten** (1879-1960) asentaron las bases de la cinética enzimática. **Stanley Cohen** (n 1922) y **Rita Levi-Montalcini** (n 1909): PNFoM 1986 por su descubrimiento de los factores de crecimiento. **Francis Harry Compton Crick** (1916-2004) y **James Dewey Watson** (n 1928): PNFoM 1962 por sus descubrimientos relacionados con la estructura molecular de los ácidos nucleicos y su significado para la transferencia de información en los seres vivos (en el sentido de las agujas del reloj)

* Las figuras en color se encuentran agrupadas al final de este Discurso.

nes, aspiraciones, tanteos y logros (MORAVCSIK 1974). También pasión, belleza, creatividad, optimismo, intuición y juego limpio; lo que Subrahmanyan Chandrasekhar refirió como «Verdad y Belleza. Estética y Motivación en Ciencia» (CHANDRASEKHAR 1987) (FIGURA 3).

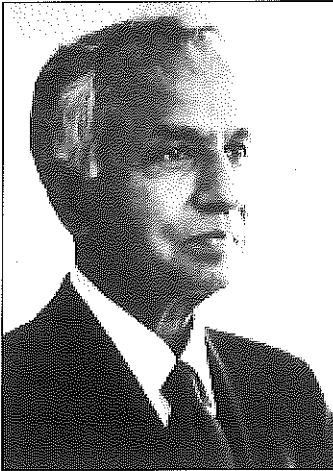


FIGURA 3. Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995): Premio Nobel de Física 1983 por sus estudios teóricos de los procesos físicos que explican la estructura y la evolución de las estrellas.

Pero la Ciencia, también como otras actividades humanas, tiene un doble rostro —el Jano científico—, que incluye la competitividad y un juego, al menos, turbio; un toma y daca donde intuición, determinación y «picardía» son ingredientes importantes. Durante el tiempo asignado discurriré por un tema cuyo cuño de partida fue la disputa de la propiedad intelectual: tres patentes en liza (FIGURA 4), una intensa rumorología y ácido carteo entre los autores (LALVANI 1996). En un principio, un desarrollo transdisciplinar en el que un dueto, mezcla de arte y tecnociencia, formado por el arquitecto Richard Buckminster Fuller y el artista Kenneth D Snelson (FIGURA 5), llevó

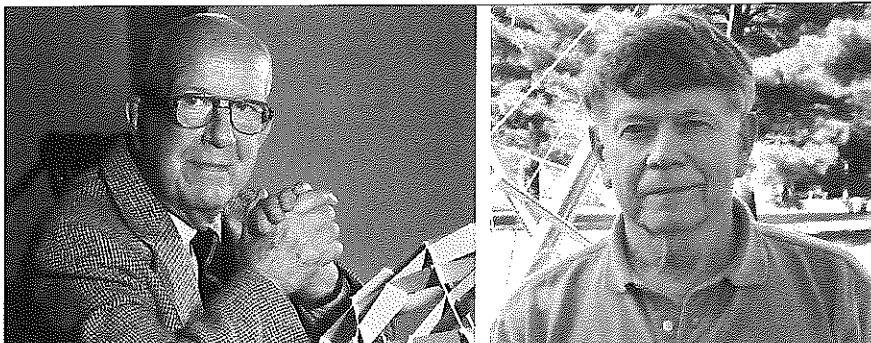


FIGURA 5. Richard Buckminster Fuller (Milton, Mass, 1895 – Los Angeles, CA, 1983) y Kenneth D Snelson (Pendleton, Oregon, 1927).

a cabo una idea común en edificios y en esculturas; una interactividad entre arte y ciencia de la que deriva, en sus diversas propuestas, un potencial impacto sobre las creaciones científicas, artísticas y estéticas (BRITTON & COLLINS 2003; LEONARDO ON-LINE; MOLINA & LANDA 2000). Una idea que se plasmó en una nueva palabra: *tensegridad* (B. FULLER 1961) Pero, ¿y el tercer participante? Pocas referencias y tal vez escaso interés por David G Emmerich, arquitecto francés que abordó el desarrollo de «unidades estructurales autotensadas» («*autotendants*») (EMMERICH 1988) y su utilización arquitectónica. Años después, un nuevo y determinante actor, el biólogo Donald E Inger aplicó el concepto a la arquitectura de la vida; con ello pretendió, remedando el reto de la Física, la «gran unificación» de la Biología (INGBER 1998).

Las unidades biológicas, las células, están expuestas durante sus vidas a una amplia gama de fuerzas físicas, desde las generadas por sus asociaciones con otras células y la matriz extracelular, hasta la fuerza constante de la gravedad (INGBER 1999). Las fuerzas mecánicas juegan un papel importante en la organización, crecimiento, maduración y función de los tejidos vivos (PIENTA & COFFEY 1991; RYAN 1989). A nivel celular muchas de las respuestas biológicas a fuerzas externas se originan en dos tipos especializados de microestructuras: adhesiones focales que conectan a las células con la matriz extracelular (MEC), y uniones adherentes que mantienen unidas a las células adyacentes (BURRIDGE & CHRZANOWSKA-WODNICKA 1996). La transmisión de fuerzas desde el exterior celular a través de la matriz extracelular y de los contactos intercelulares parece que controla el establecimiento o el desensamblaje de tales adhesiones e inicia una cascada de señales intracelulares que comprometen numerosos comportamientos celulares (FIGURA 6). En respuesta a las fuerzas aplicadas externamente, las células replantean activamente la organización y tensión (contracción) del citoesqueleto y redistribuyen las fuerzas intracelulares (INGBER 1993a; INGBER & COL 1994). Varios estudios sugirieron que la concentración localizada de tales tensiones del citoesqueleto en las zonas de adhesión es, también, un mediador importante de la vía de señales de origen mecánico (DENNERLL & COL 1988; GARCÍA-AÑOVEROS & COREY 1997; JANMEY 1998; KACZANOSKA & COL 1995).

Mecanotransducción es el proceso de transducción de señales celulares en respuesta a los estímulos mecánicos. De manera tradicio-

nal, los investigadores distinguen la mecanotransducción de otros tipos de procesamiento de señales; ello sobre la base de que asumen que aquella ocurre independientemente de la activación secundaria a la interacción entre ligandos y sus receptores sobre la superficie celular. La mecanotransducción convierte el estímulo mecánico en una secuencia química a partir de la distorsión membranar (ALENGHAT & INGBER 2002). Ello condujo a la búsqueda de componentes de la membrana que pudieran mediar tal conversión mecanoquímica, identificándose canales iónicos mecanosensibles que se disponen ubicuamente en la membrana celular (GILLESPIE & WALTER 2001). Tales canales incrementan o disminuyen el flujo iónico cuando la membrana celular es estimulada mecánicamente, tanto en las células ciliadas del oído interno como en las neuronas táctiles cutáneas (LITTLEWOOD & MÜLLER 2000; LYNCH & COL 1997; PINES *www*; PRICE & COL 2000; SRINIVASAN & COL *HTTP*) (FIGURA 7).

Las respuestas a los estímulos mecánicos están bien estudiadas en muchos tipos celulares y en numerosos sistemas orgánicos diferentes (WATSON 1991). Osteocitos, osteoblastos y osteoclastos mecanosensibles supervisan el remodelamiento óseo en respuesta a las cargas compresoras fisiológicas y anormales; células musculares lisas modifican su tono como respuesta al incremento de la presión intraluminal en los vasos sanguíneos, bronquios o intestino; el estrés mecánico estimula a los fibroblastos a producir y depositar proteínas en la MEC; células endoteliales expresan genes que codifican factores atroprotectores en respuesta al estrés de cizallamiento que provoca el flujo sanguíneo, y la tensión estimula la neoformación de microtúbulos (KAVERINA & COL 2002; SATCHER & DEWEY 1996; WEINBAUM & COL 2003) (FIGURA 8). En estos casos —osteocitos, endotelocitos, miocitos y fibroblastos— las células involucradas no son células comprometidas primariamente en la percepción mecánica; ninguna de ellas es una célula mecanosensible especializada. Pero en ambos casos —células mecanosensibles especializadas como las auditivas y células no mecanosensibles en principio como osteocitos— comparten el papel protagonista del citoesqueleto en la transducción de la señal. Diversos estudios han demostrado que el soporte mecánico de las células no es un continuo mecánico o una membrana cortical en tensión. La trama mecánica celular es un conjunto de elementos discretos del citoesqueleto que comparte la compresión en cooperación con la MEC; ello a efectos de pretensar y así estabilizar un entramado

do de elementos tensionales. Los elementos de compresión intracelulares son, en principio, microtúbulos (polímeros de dímeros de tubulina); por su parte, los elementos de tensión son, ante todo, microfilamentos de actina y filamentos intermedios (INGBER 1997; PARAMIO & JORCANO 2002; PIPPEL HTTP; WANG & INGBER 1994; WANG & COL 1993).

En respuesta a la carga mecánica —puntual o sobre el conjunto celular— se produce un desplazamiento de elementos del citoesqueleto; ello, siguiendo un patrón de deformabilidad consistente con predicciones matemáticas basadas en modelos de la arquitectura celular; en uno de ellos el pre-estrés tensional juega un papel estabilizador esencial. Tales hallazgos establecen que las cargas aplicadas sobre la superficie celular son absorbidas, preferentemente, por el citoesqueleto; y, más importante, que la transmisión de la carga depende de la conectividad mediada por moléculas especializadas entre la MEC, la superficie celular y el citoesqueleto. ¡Esto es tensegridad! (FIGURA 9).

Tensegridad: orígenes

En otoño de 1948, mientras experimentaba nuevas estrategias para construir torres modulares flexibles, un joven artista —Kenneth Snelson— inició una clase de esculturas nunca vista antes (FIGURA 10). Tan etéreas en apariencia como los móviles de Alexander Calder y sin elementos obvios que soporten peso alguno, sin embargo mantienen su forma y estabilidad. En el verano siguiente mostró cierta estructura —todavía no una escultura— a su mentor, el polifacético y aún no famoso Richard Buckminster Fuller, quién incorporó de inmediato el hallazgo de Snelson como una pieza central de su sistema de sinérgica (B. FULLER 1979; EDMONDSON WWW; FEARNLEY 1994). Fuller se referiría a los nuevos objetos en términos de «mis estructuras» (B. FULLER 1965). En el proceso de apropiación, Fuller acuñó la denominación por la que hoy se conocen y que hace referencia a su propiedad de integrar la tensión de la estructura confiriéndola estabilidad (FIGURA 11). El término *tensegrity* —tensegridad— se forma a partir de «*tensional integrity*»: integración tensional o tensión integrada (B FULLER & APPLEWHITE 1997). Las esculturas de Snelson, en que barras o componentes de compresión aparecen como

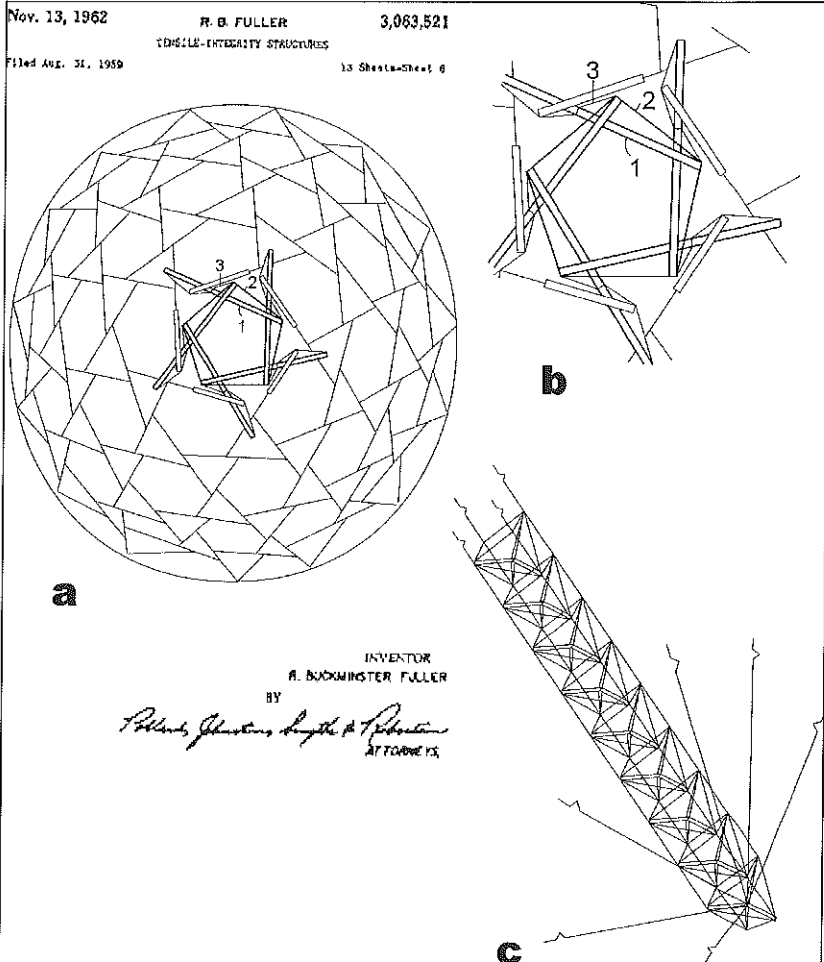


FIGURA 11. Título: *Tensile-Integrity Structures*. Inventor: R B Fuller. Patente 3063521; presentada: 31 agosto 1959; concedida: 13 noviembre 1962.

suspendidas en el aire por cables casi-invisibles o alambres extremadamente finos, pueden admirarse por todo el mundo. Valiosos juguetes (TENSEGRITTOY WWW) infantiles —y para adultos— y figuras decorativas utilizan los mismos principios que las tensegridades originales de Snelson. También los futuros tensegrirrobot operarán con esos mismos principios. Aunque podría argüirse que las primeras tensegridades no fueron hechas por humanos: una tela de araña es una estructura de tensegridad (tensegridal), aunque sin partes rígidas o componentes de compresión (ELICES 1999) (FIGURAS 12 Y 13).

En resumen, se establece un sistema de tensegridad cuando un conjunto discontinuo de componentes de compresión interacciona con otro conjunto continuo de componentes de tensión, para definir un volumen estable en el espacio (PUGH 1976). Los componentes de una estructura de tensegridad están siempre en tensión o sometidos a compresión. Los componentes tensiles suelen ser cables o elementos elásticos, y los componentes de compresión secciones de tubos. Los componentes de tensión forman un entramado continuo, con lo que las fuerzas de tensión se transmiten instantáneamente a través de toda la estructura. Los componentes de compresión son discontinuos, con lo que solo trabajan localmente; dado que no transmiten cargas a distancia no están sujetos a la carga global de la estructura con lo que pueden ser más gráciles sin sacrificar la integridad estructural. En palabras de Richard Buckminster Fuller, las estructuras tensegridales son «islas de compresión en un océano de tensión» (MOTRO 2003) (FIGURA 14).

Tensegridad: los protagonistas – Richard Buckminster Fuller y Kenneth B Snelson

Richard Buckminster Fuller es conocido universalmente por su invento de la cúpula geodésica; la construcción más ligera, resistente y con mejor relación coste-eficacia jamás diseñada; ello, aunque presenta problemas sin resolver (SIEDEN 1989; SKELTON & COL FTP; URNER www). La cúpula geodésica es capaz de cubrir más espacio sin soporte interno alguno que cualquier otro confinamiento (FIGURA 15). La estructura se hace, proporcionalmente, más ligera y resistente cuanto mayor es. Una de las de mayores dimensiones alberga la *Spruce Goose Exhibiton* en Long Beach Harbor, y la más famosa es el pabellón de EEUU en la Expo'67 en Montreal. Incluso proyectó una cúpula de dos millas de diámetro para amparar Manhattan en un ambiente controlado, y que podría autofinanciarse en diez años con el ahorro de los costes de la retirada de la nieve cada invierno. Su mapa *Dymaxion*® (*Dynamic Maximum Tension*), un atlas terráqueo, representó la primera patente de un sistema cartográfico y también el primero que representó los continentes sobre una superficie plana sin distorsiones aparentes; el mapa presenta a la masa continental como una isla en medio de un océano (FIGURA 16). En otro tema, acuñó la frase: «no hay crisis energética, sólo una crisis de ignorancia»; siendo su respuesta a las

necesidades básicas la casa y el coche *Dymaxion*® (MARKS 1960). Todo ello desembocó en una ciencia del diseño —una aproximación a la solución de problemas que implica un estudio riguroso, sistemático, de la ordenación deliberada de los componentes de nuestro universo— de la que surgieron el capitalismo natural y la permacultura (*permaculture* = *permanet* + *culture*), y el biomimetismo (FIGURA 17), las biomicromáquinas y las casas autosuficientes. Además, su apellido da nombre a estructuras específicas de carbono: fullerenos. Para Fuller, la tensegridad es la estrategia estructural de la naturaleza (B. FULLER INST WWW; SADAO 1996). Tal fue su compromiso con esta filosofía que su nombre identifica —*fullereno*— a la tercera forma del carbono, tras el diamante y el grafito (APPLEWHITE 1995). De ella a los nanotúbulos y nanoconos (FIGURA 18) e, inmediatamente después a la realidad de la teórica nanociencia-nanotecnología apuntada por Richard Feynman (ELICES 2003; FEYNMAN 1959; MERKLE WWW; ROCO & BAINBRIDGE 2001) (FIGURAS 19 Y 20).

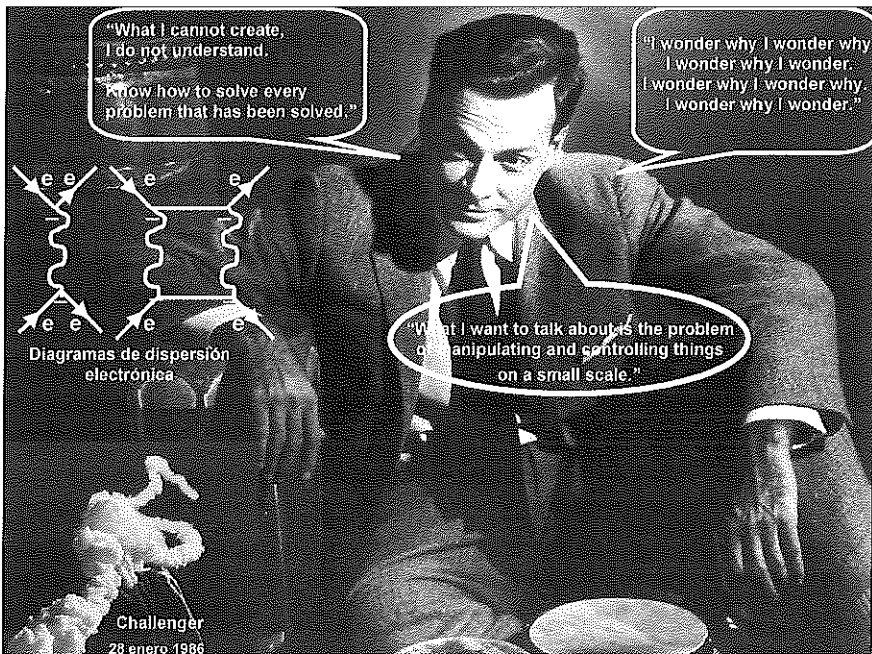


FIGURA 19. Richard P Feynman (1918-1988). Premio Nobel de Física 1965 (con Sin-Itiro Tomonaga y Julian Schwinger) por sus trabajos fundamentales en electrodinámica cuántica y sus importantes consecuencias para la física de partículas elementales. Su “clásica” conferencia “*Plenty of room at the botton*”, pronunciada el 29 de diciembre de 1959, en la reunión anual de la Sociedad de Física Americana, en Caltech, abrió las puertas a una ciencia nueva: naotecnociencia o nanotecnología.

El siguiente protagonista es Kenneth Snelson (SNELSON WWW.K). Nacido en Oregon, en 1927, Snelson proclama que «mi arte está comprometido con la naturaleza en su aspecto primario: el diseño de fuerzas físicas en el espacio tridimensional» (SNELSON WWW.T). La mayoría de la gente que se acerca a la tensegridad cree —escribe Snelson (SNELSON 1996)— que fue un invento de Buckminster Fuller. Una lectura detallada de los escritos de Fuller desvela que nunca reclamó tal inventiva; lo que él acuñó fue el término «tensegridad», una combinación de sílabas de tensión e integridad. Lo que relataré —continúa Snelson— es cómo inventé una nueva clase de estructura que acabó conociéndose como tensegridad. Como sucede con muchas ideas, descubrí el principio de tensegridad en el curso del mero placer de experimentar; en mi caso jugaba con ideas que pudieran aplicarse a esculturas con posibilidad de realizar movimientos. Era —sigue Snelson— un estudiante de segundo año de Arte en la Universidad de Oregon cuando conocí la Bauhaus alemana (BAUHAUS DESSAU FOUNDATION WWW; WHITFORD 1984) y a los artistas Klee, Kandinsky, Maholy-Nagy y a otros (FIGURAS 21 Y 22). Uno de ellos, Josef Albers, se había trasladado al Black Mountain College, en Carolina del Norte; un colegio liberal, progresista que, en aquellas fechas, atraía a gente de talento, artistas principalmente, a quienes se invitaba a participar en los cursos de verano (FIGURA 23). La pobla-

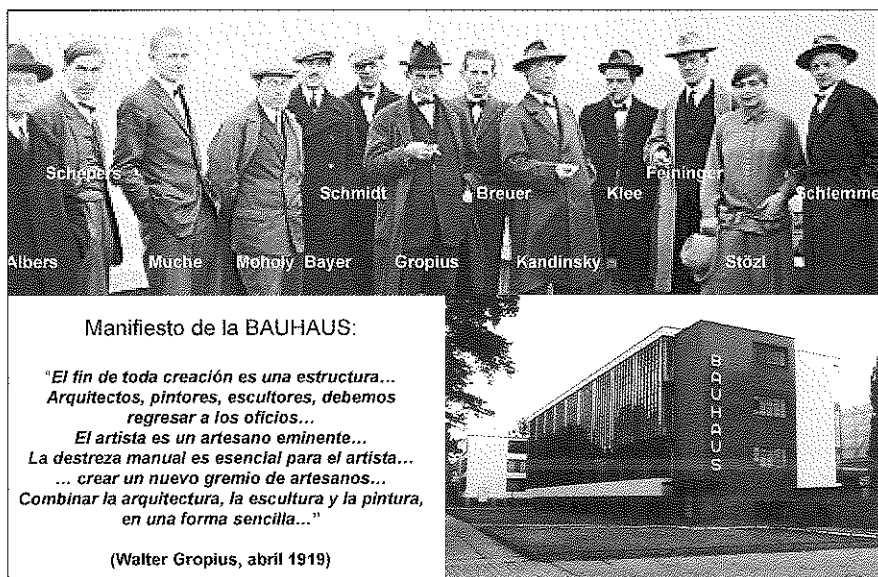


FIGURA 21. La Bauhaus (1919-1933) en Dessau y sus profesores, en 1926.

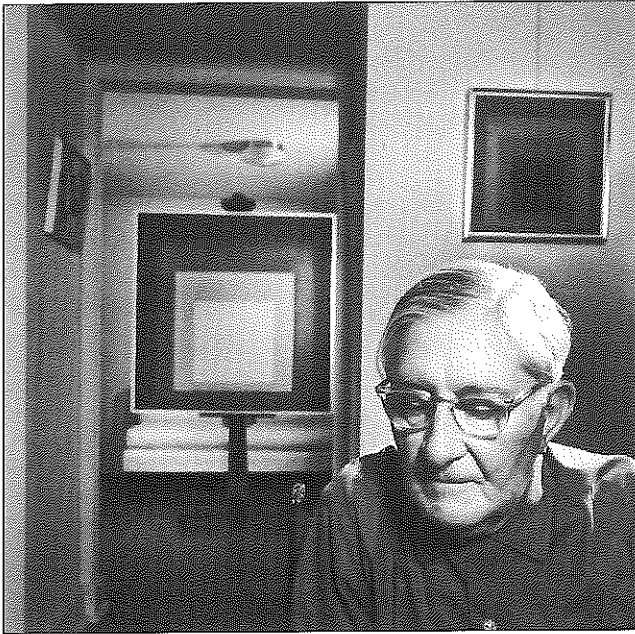


FIGURA 23. Josef Albers (1888-1976): *Homage to the Square*.

ción local veía el lugar como un nido de alborotadores. El verano en que yo me incorporé —anota Snelson— había cincuenta alumnos y unos pocos profesores. Richard B Fuller estuvo dos semanas; las últimas porque fue invitado en el último minuto para sustituir a otro arquitecto quién falló sin previo aviso. El nombre de Fuller no era famoso, así que su llegada no despertó especial interés. Lo único destacable es que había viajado desde New York conduciendo un trailer repleto de modelos arquitectónicos. Se me encomendó que ayudara al recién llegado a preparar el material para su clase, así que fui al camión aparcado cerca del auditorio. Al primer vistazo algo me dijo que estaba ante algo nuevo; estaba ante lo que parecían estudios geométrico-matemáticos: docenas de poliedros de cartón de todas formas y tamaños, esferas construidas por grandes círculos, construcciones a partir de bandas metálicas y de elementos triangulares de plástico. Seguí sus instrucciones y trasladé el material, modelo tras modelo. Aquella tarde, cuando se despejaron las mesas del comedor, la audiencia se preparó para escuchar al nuevo orador. Era un hombre pequeño y fornido, de pelo blanco y con unas enormes gafas. Tras un breve silencio interminable comenzó a tartamudear. Descri-

bió el cuerpo humano en términos robóticos: un bípedo móvil y multiadaptable. También entramos en contacto con edificios livianos, esferas geodésicas compuestas de grandes círculos y con el coche *Dymaxion*®; todo ello explicado a partir de su Geometría energética, basada en el triángulo y en el tetraedro en vez de en el cuadrado y en el cubo. Una geometría que revolucionaría las matemáticas y la física. Para todos nosotros, estudiantes de Arte, su mensaje se encaminaba hacia el diseño de un mundo nuevo que salvaría a la humanidad de su autodestrucción. El Colegio pareció mesmerizarse con su imaginería futurística. Algún profesor se quejó de que estábamos perdiendo el tiempo con un charlatán. Algunos, yo incluido, pensamos que se trataba de algo grande. Comenzamos a llamarle «Bucky». El resto del curso, profesores y alumnos abarrotábamos sus clases matinales. Continué como ayudante de clase y me pregunté si debía continuar pintando o, como Albers advertía, debía pasarme a la escultura. A finales del verano estaba muy influido por las ideas *Dymaxion* de Fuller; un grupo de alumnos era conocido como los «Bucky-Fulleritos» o los *Dymaxion-Fellows*.

Bucky fue un hombre de su tiempo —recalca Snelson—. En aquellos días inmediatamente después de la Segunda Guerra Mundial, el país estaba abatido y Fuller era un optimista atractivo que hacía creer a su audiencia que el mundo podía salir adelante si se hacían las cosas a su manera. Tenía carisma y un mensaje: salvar a la humanidad y resolver sus problemas mediante el diseño racional utilizando las tecnologías más avanzadas. Por mi parte, fue la geometría y las ideas estructurales las que me engancharon, aunque tenía mis dudas sobre si sería capaz de salvar al mundo. Finalizado el curso de verano pasé los cuatro meses siguientes en casa, construyendo cosas. Conocía por Fuller la llamada Geometría energética, y por Albers algo del constructivismo de la Bauhaus. Decidí aplicar ambas ideas. Escuchando a Fuller una tenía la impresión de que él había descubierto, por vez primera, que el tetraedro y el octaedro eran formas trianguladas y que proporcionaban estructuras sólidas; incluso que Fuller había inventado el triángulo. Durante el otoño e invierno de 1948-49 construí varios estudios, de bastante altura, móviles y estáticos (FIGURA 24). Estas esculturas incorporaban los conceptos de Fuller y de Albers. Tres de ellas tuvieron un interés especial. La primera parecía una variación de los familiares balancines. La evolución a la segunda construcción hacía pensar más en una variación

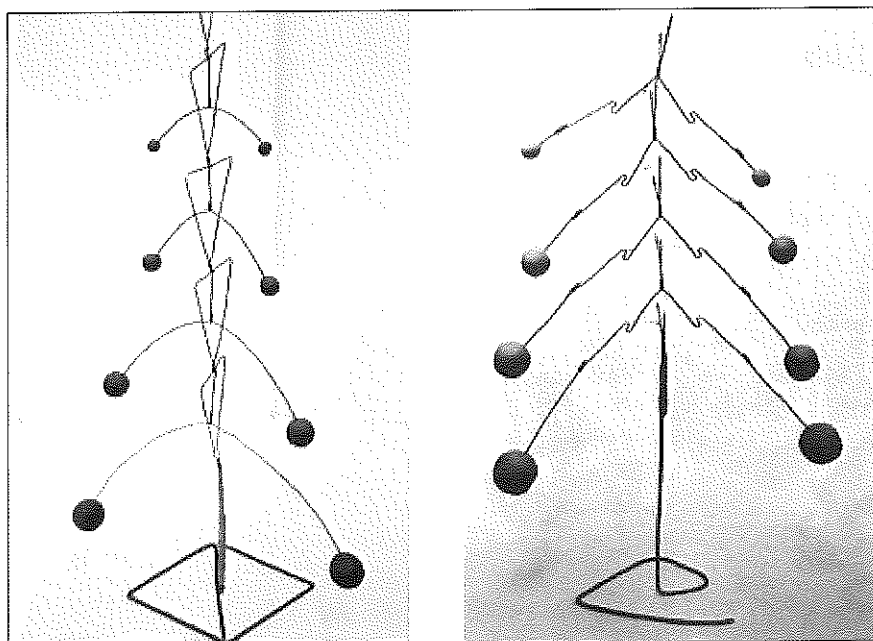


FIGURA 24. Kenneth D Snelson: *One to another*, 1948; *One to the next*, 1948.

de los *mobiles* de Calder que de estructuras de tensión/compresión elementales. Lo que perseguía era mantener unidos los componentes en la estructura global por medio de algún engarce mágico; al menos tan desapercibido como las cuerdas de las marionetas. Para ello eliminé los brazos de balanceo y empleé líneas de tensión adicionales. Mi primera estructura estable estuvo construida con dos piezas en forma de «C». Era evidente que el perfil ideal era un módulo en forma de «X», pues proporcionaba cuatro cuadrantes para añadir nuevos elementos. Escribí a Bucky y le envié algunas fotos de mis construcciones. Volví a *Black Mountain* en el verano de 1949, llevándome conmigo la «columna X» (FIGURA 25). Bucky, que no había prestado mucha atención a mis fotos, observó la estructura y me preguntó si podía quedársela. Asentí, a la vez que me di cuenta de que no le desagradó que hubiera empleado «su» geometría para hacer arte [algo que el verano anterior no habría tolerado]. Al día siguiente me comentó que las posibilidades mejorarían utilizando los ángulos centrales de un tetraedro en vez de los de elementos X. Desde mi punto de vista creí que la forma X era mejor, pues permitía el crecimiento de la estructura en cualquier dirección a partir de cualquier

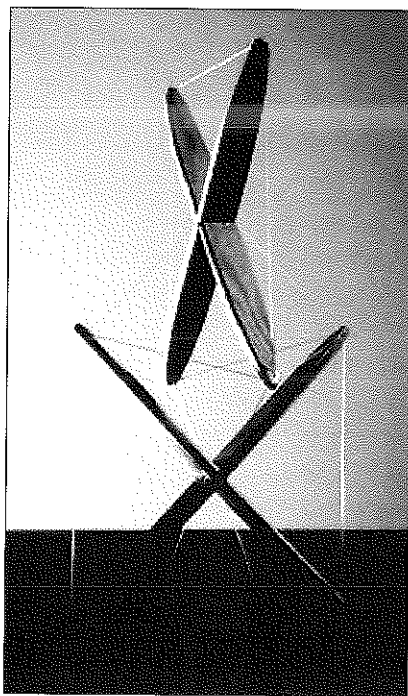


FIGURA 25. Kenneth D Snelson: *X-Shape*, 1948.

cuadrante, y no sólo a lo largo de un eje en el caso de utilizar tetraedros. En aquellas fechas los estudiantes poco podían hacer frente a las opiniones de los profesores. Fui a un almacén para comprar una docena de elementos telescópicos para cortinas. Siguiendo las indicaciones de Fuller ensamblé los elementos con facilidad. Al día siguiente Fuller estaba encantado con «su» nueva estructura: un mástil de compresión discontinua (FIGURA 26).

Estando en París —remacha Snelson próximo el final de su relato—, estudiando con Fernard Leger, un día de agosto de 1951 me topé en un quiosco con la cubierta de la revista *Architectural Forum*, que reproducía el perfil inconfundible de una cúpula geodésica; en el interior, un artículo sobre los experimentos de Fuller y una foto de «mi» mástil sin más referencia que el nombre de quién había tomado la foto. Desde entonces la estructura fue atribuida a una invención de Bucky. El daño —apostilla Snelson— estaba hecho. Fuller había accedido a la publicidad y, lección de lecciones, el poder está en la prensa. La palabra tensegridad no aparecía en

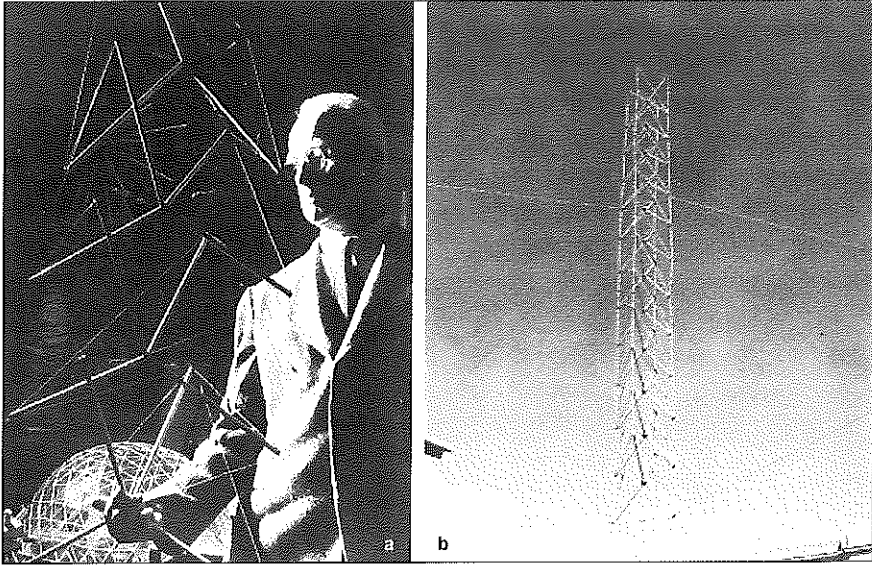


FIGURA 26. RB Fuller con el mástil tensegridal construido por KD Snelson en 1949 (a).
RB Fuller: Mástil tensegridal, 1950, North Carolina State Collage (b).

el artículo; la acuñó cinco años después. La reparación, parcial, tuvo lugar en noviembre de 1959, en una exposición de la obra de Fuller en el MOMA (*Museum of Modern Art*) de New York: *Three Structures by Buckminster Fuller*; entre ellas el mástil tensegridal. Fui presentado a Arthur Drexler, responsable del Departamento de Arquitectura del museo, a quién expliqué mi autoría de la obra. En el catálogo de la exposición apareció: «El principio involucrado en el mástil tensegridal fue descubierto inicialmente por Kenneth Snelson en 1949 ...» (FIGURA 27).

Tensegridad: actores de reparto - Alexander Calder y David Georges Emmerich

Una figura que aparece fugazmente en las trayectorias de Richard B Fuller y Kenneth Snelson, es Alexander Calder (CALDER FOUND WWW) (FIGURA 28). El primero en cuanto a la inclusión del artista en diferentes anécdotas, y Snelson al comparar sus primeras esculturas en movimiento con los «móviles» de Calder —una comparación que surge con insistencia; sin embargo, Calder no refiere una sola vez el

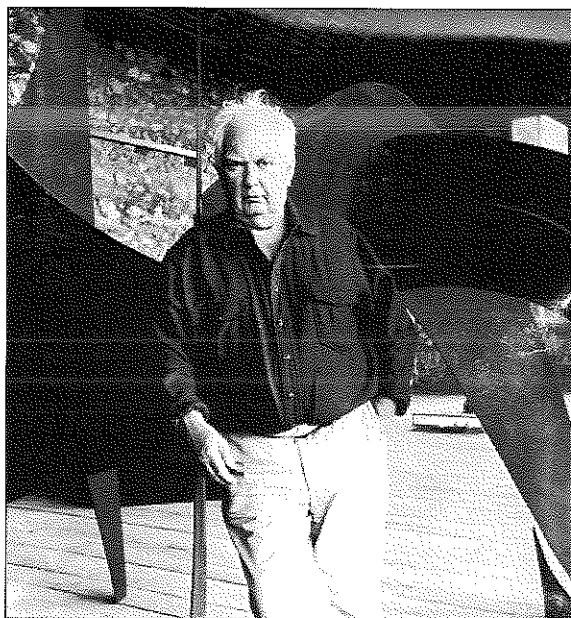


FIGURA 28. Alexander Calder (Pennsylvania, 1898 – New York, 1976).

nombre de estos autores en sus memorias—. Alexander «Sandy» Calder (Lawton, Pennsylvania, 1898-New York, 1976) se inició, siendo muy joven, en la construcción de juguetes. En 1926 se trasladó a París, donde creó el *Cirque Calder*, una representación artística que utilizaba pequeñas figuras circenses, planas, hechas por él a base de alambre, madera, tela y otros materiales (FIGURA 29). Luego, profundizó en el manejo del alambre realizando objetos tridimensionales continuos para, a finales de 1930, realizar sus primeras esculturas abstractas que culminaron en composiciones con diferentes elementos muy simples, en equilibrio dinámico inestable que las hacen sensibles a mínimas corrientes de aire. Esas esculturas de alambre y de diversas formas realizadas con láminas de metal fueron bautizadas como «móviles» —*mobiles*— por Marcel Duchamp, quien sugirió tal nombre —ya lo había él utilizado opcionalmente para su *Rueda de bicicleta*— para una exposición de la obra de Calder en la Galería Vignon de París, en 1932 (FIGURA 30). Por su parte, Jean-Paul Sartre escribía sobre la obra de Calder: «Un móvil: una pequeña celebración particular; un objeto definido por su movimiento y que no existe sin él, una flor que se marchita en cuanto se detiene, un simple juego de movimientos de la misma manera que existen simples juegos de luces... La

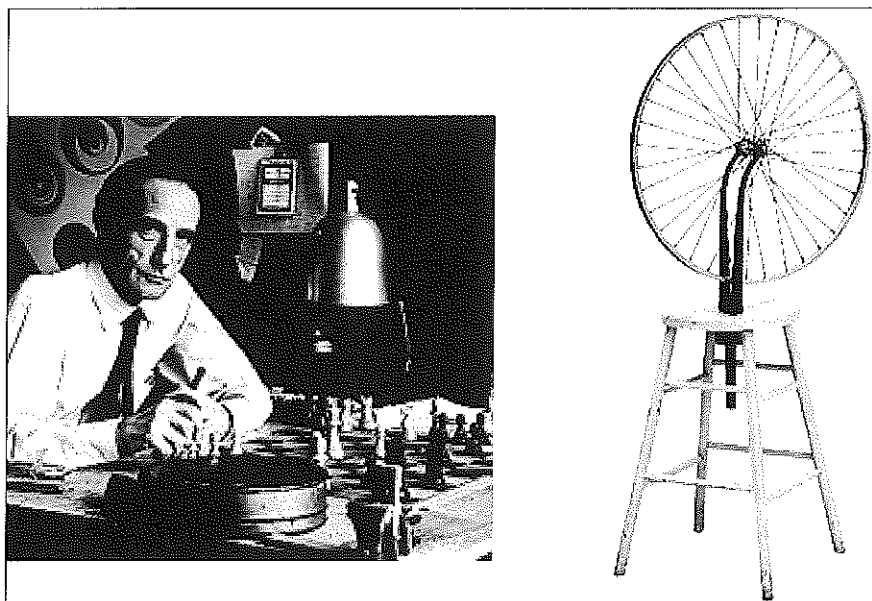


FIGURA 30. Marcel Duchamp (1887-1968): *Rueda de bicicleta*, 3.^a versión (1951) tras la pérdida del original (1913).

escultura sugiere el movimiento, la pintura sugiere la profundidad o la luz. Calder nada sugiere: imita auténticos movimientos animados y les da forma. Sus móviles no significan nada más que a ellos mismos: son, eso es todo; son absolutos. Son más impredecibles tal vez que cualquier otra creación humana... Decía Valéry del mar que estaba siempre recomenzando. Un objeto de Calder es parecido al mar e igual de subyugante: siempre recomenzando, siempre nuevo... El móvil del Calder tiene un movimiento ondulatorio, titubea, se diría que se equivoca y que rectifica... Aunque Calder no haya querido imitar nada sino crear escalas y acordes de movimientos inéditos, sus móviles son a la vez invenciones líricas, combinaciones técnicas, casi matemáticas y, al mismo tiempo, símbolo apreciable de la naturaleza baldía que desperdicia el polen y produce bruscamente el vuelo de mil mariposas, de la cual nunca se sabe si es el ciego encadenamiento de causas y efectos o el tímido desarrollo, siempre retardado, alterado, de una idea surgida inopinadamente». «La gente cree —comentaba Calder— que los monumentos deben salir de la tierra, nunca del techo, pero los móviles pueden ser monumentos también» (FIGURA 31). Calder también desarrolló «estables» —stables: nombre sugerido por Jean Arp—; esculturas estáticas que sugieren un volumen limitado por

múltiples planos. Sus últimas creaciones fueron enormes esculturas de líneas arqueadas y perfiles abstractos que pueden contemplarse por las plazas públicas de todo el mundo (FIGURA 32). Calder fue un artista original que definió volúmenes sin masa e incorporó el tiempo y el movimiento al arte. Sus invenciones redefinieron ciertos principios básicos de la escultura.

Por su parte, Rene Motro (MOTRO 1992), profesor de Ingeniería civil en la Universidad de Montpellier II, especialmente interesado en los sistemas tensegridales, escarba en los orígenes de los sistemas de tensegridad de la mano de su compatriota el arquitecto David Georges Emmerich, quién endosa la autoría a constructivistas rusos. Ello a través de un libro publicado por Laszlo Molí Nagy (*Von Material zu Architektur*, Moscú, 1929 y 1968) donde se recogen dos fotografías de una «estructura en equilibrio» (Gleichgewichtskonstruktion) realizada por Karl Johansen y tomadas en una exposición que tuvo lugar en Moscú, en 1921. «Esta curiosa estructura —comenta Emmerich (EMMERICH 1996)— consta de tres barras y siete cables y es manipulable merced a un octavo cable que permite deformar el global de la estructura. Esta lábil configuración está muy próxima a una protoforma autoestresada con tres barras y nueve cables». La escultura de Johansen fue destruida por el régimen Soviético y, por lo «que se aprecia en las fotos señaladas por Emmerich», Snelson rechaza con rotundidad la pretendida autoría tensegridal del artista letón (FIGURA 33).

A efectos de traer al lado europeo del Atlántico la idea de tensegridad, Emmerich pretende apropiarse de ella por medio de sus «unidades estructurales auto-tensadas». «Yo inventé el primer conjunto básico de unidades *autotendants* a finales de 1958», escribiría Emmerich (EMMERICH 1996). Si la inspiración le llegó a Snelson en las Montañas Rocosas, a Emmerich le impregnó en la cama, en el transcurso de la convalecencia de una larga enfermedad. Un tiempo en el que el juego Mikado fue el factor desencadenante. Aunque consiguió que su patente fuera reconocida con anterioridad a la presentada por Snelson, éste trabaja con tensegridades desde el año 1949.

Tensegridad: *matemáticas*

Aunque las cúpulas geodésicas y su sinérgica dieron a Fuller renombre universal, la mayor parte de las matemáticas que utilizó Richard Buckminster estaban bien establecidas. En su trabajo «*On the calculation of the equilibrium and stiffness of frames*», publicado en 1864, J Clerk Maxwell consideró el comportamiento mecánico de estructuras compuestas por barras rígidas conectadas por sus extremos mediante juntas libres de fricción y sujetas a fuerzas externas aplicadas en tales juntas. Definió un armazón en el espacio tridimensional como «un sistema de líneas conectadas que conectan un número de puntos», y un armazón rígido como «un sistema en el que la distancia entre dos puntos cualquiera ni puede alterarse sin alterar la longitud de una o más líneas de conexión del armazón»; y demostró que un armazón que contiene j puntos (juntas) requiere, en general, $[3j - 6]$ barras para garantizar su estabilidad (rigidez), una relación que se conoce como «regla de Maxwell» y que está bien implantada en ingeniería estructural (CALLADINE 1978). Sin embargo, las tensegridades de Snelson —que no cumplen tal regla— abrieron nuevas cuestiones matemáticas que siguen ocupando a los matemáticos: qué es una tensegridad, porqué es estable o ¿pueden clasificarse las tensegridades? Branco Grünbaum fue responsable de reavivar el interés de los matemáticos en tales preguntas; ello, a comienzos de la década de los 70s, mediante unas notas mimeografiadas que tituló «*Lectures on Lost Mathematics*».

En 1980, Robert Connelly demostró una conjetura de Grünbaum sobre la construcción metódica de tensegridades planas estables (CONNELLY & BACK 1998). Con todo lo anterior, las herramientas matemáticas de las teorías de grupos y de representación, acopladas con las capacidades gráfica y computacional de los ordenadores, ha hecho posible confeccionar un catálogo completo de tensegridades referido a ciertos tipos preestablecidos de estabilidad y simetría, incluyendo algunas nunca intuitidas (FIGURA 34). Las tensegridades tienen una pureza y simplicidad que conducen de manera natural a la descripción matemática. Los estudios iniciales de Fuller, Snelson y Emmerich sobre las formas de las estructuras tensegridales utilizaron poliedros convexos regulares como base para el hallazgo de nuevas configuraciones. Esta aproximación puramente geométrica resultó en un gran número de configuraciones que Pugh clasificó a partir de tres

tipos de patrones básicos: diamante, circular y zig-zag (PUGH 1976). Sin embargo las formas tensegridales no corresponden exactamente, no son idénticas, a sus poliedros de referencia, de tal manera que es necesario encontrar la configuración de equilibrio incluso para la estructura tensegridal más simple. Las estrategias o métodos para definir tales formas (*form-finding methods*) han sido abordadas por diferentes autores. AG Tibert y S Pellegrino han revisado y clasificado los métodos de rastreo de formas, y las han agrupado en dos grandes familias: métodos cinemáticos y métodos estáticos. Los primeros incluyen soluciones analíticas, la optimización no lineal y métodos de relajación dinámica. Los métodos estáticos abarcan soluciones analíticas, los métodos de densidad de fuerzas y de energía y el método de coordenadas reducidas (TIBERT & PELLEGRINO WWW, WWW2).

Tensegridad: *ampliación*

Uno de los requisitos a la hora de abordar soluciones para construir sistemas de tensegridad es que los elementos de tensión son rectilíneos por naturaleza. Los elementos de compresión pueden tener ejes rectilíneos pero no es incongruente que los sistemas de tensegridad incluyan subsistemas cuyos componentes de compresión sean ensamblajes curvados de elementos rectilíneos —por ejemplo las esculturas de Moreno (en especial «*Crescent Moon*») incluyen poliedros estrellados cuyos elementos de compresión son triángulos entrelazados— o de elementos intrínsecamente curvos como los anillos de compresión de las cúpulas de Geiger. El «diseñador conceptual» hispano-canadiense Rafael Felipe Moreno —alias «Falo»—, estudioso de formas tridimensionales, ha centrado su atención en el desarrollo y construcción de esculturas interactivas; ello sobre la base de los sistema de tensegridad (MORENO 1999) (FIGURA 35).

Por su comportamiento integrado, las estructuras tensegridales remedan organismos vivos. Un elemento cualquiera, una barra o un tendón, está ligado al conjunto de tal manera que cualquier mínimo cambio que experimente altera todos y cada uno de los componentes de la estructura (FIGURA 36). Y esto ocurre de una forma extraordinariamente directa y simple (CHEN & INGBER 1999). La economía de esta transmisión de información es absolutamente sencilla, no intervinendo en ella otros elementos sino los que proporcionan la misma

consistencia a la estructura. El control de la estructura misma en sus posibles modificaciones se puede realizar sin violencia alguna para ella, utilizando las mismas tensiones ya inherentes y variando simplemente sus intensidades. La torsión de alguno de los componentes, que tradicionalmente era el mecanismo normal para las modificaciones estructurales, está aquí ausente. En las estructuras de tensegridad todas las fuerzas que aparecen son fuerzas axiales y, así, el encorvamiento o pandeo global de la estructura se efectúa sin necesidad de pandeo de ninguno de sus componentes. La simplicidad de las estructuras tensegridales, esencialmente con dos tipos de sencillos componentes —barras y tendones— con su economía de energía y de espacio, hace posible, si es deseable, una redundancia que resulta bien económica desde muchos puntos de vista (GUZMÁN 2002; HANAOR 1997).

De acuerdo con la definición más general de Fuller, tensegridad incluye dos amplias clases de estructuras: pre-estresadas y geodésicas (SKELTON & COL 2001). Las primeras, a las que acaba de hacerse referencia, mantienen la posición o estabilidad de sus vértices sobre la base de un pre-estrés (estrés tensor preexistente o tensión isométrica) en la estructura. La segunda triangula sus componentes estructurales que, orientados a lo largo de geodésicas (trayectos mínimos), consiguen una geometría estable. El cuerpo humano proporciona un ejemplo familiar de estructura tensegridal pre-estresada: los huesos representan barras que resisten la tracción muscular y la tensión de tendones y de ligamentos; con ello, el tono (pre-estrés) muscular modula la estabilidad (rigidez) de la figura corporal (FIGURA 37). El cuello de la jirafa o la acción de levantarse de la cama cada día son ejemplos perfectos de tensegridad en acción, de dinámica tensegridal (LEVIN SM 1982, 1995, 1997). Ejemplos de tensegridad geodésica incluyen las cúpulas geodésicas de Fuller, los fullerenos y las macrocelosías tensegridales (FIGURA 38). Estos últimos incluyen las denominadas estructuras tetraédricas, popularizadas a través de la NASA, que mantienen su estabilidad en ausencia de gravedad y, por tanto, sin compresión continua, y también las denominadas hiperestructuras flotantes o islas artificiales y las celosías espaciales (NEWFOUNDLAND DELTAPORT HTTP) (FIGURA 39). Sin embargo, existen problemas para la aplicación práctica de la tecnología tensegridal: congestión de componentes de compresión; pobre respuesta a la carga en relación con las estruc-

turas convencionales; fabricación compleja, y herramientas de diseño inadecuadas (BURKHARDT 2004).

Tensegridad: *la arquitectura de la vida*

La célula es la unidad básica de la vida; su nombre alude simplicidad autocontenida. Sin embargo, Donald [Don] B Ingber, un biólogo celular en el Departamento de Cirugía del Hospital Infantil de la Facultad de Medicina de la Universidad Harvard, apunta que la célula tiene un problema de imagen. El dogma define la célula como un balón relleno de orgánulos en un citoplasma poco estructurado, y en el que el citoesqueleto proporciona un armazón que soporta la forma (BROOKES 1999; PIANTA & COL 1991). Esta visión simplista —apunta Ingber— no hace justicia a la compleja realidad celular (FIGURA 40). Porqué, por ejemplo, tras manipular una célula recupera rápidamente su forma original, o porqué determinado tipo celular adopta formas diferentes sobre distintas superficies, o porqué las células planas se dividen y las esféricas mueren (CHEN & COL 1997; HUANG & INGBER 2000; SINGHVI & COL 1994). En la década de los 1980s se alzaron voces disidentes al modelo celular convencional, apuntándose, entonces, que el modelo de tensegridad es aplicable en todas las escalas de tamaño de la jerarquía de la vida (INGBER & JAMESON 1982, 1985). La mayoría de los modelos teóricos en biología —señala Ingber— proporcionan mecanismos creíbles para explicar un conjunto de datos experimentales. Sin embargo, el que un fenómeno biológico pueda ser explicado por una teoría simple no significa que sea correcto. El poder del paradigma tensegridad, en contraste con modelos puramente descriptivos —por ej. fractales—, es que proporciona un sistema tangible e inherentemente operativo que predice cómo interactúan las moléculas para formar estructuras tridimensionales que exhiben forma y función especializadas (BUTCHER & LAMB 1984).

La cultura occidental está obsesionada con el orden, la disciplina y la simetría; tanto que, con frecuencia, se imponen a la naturaleza patrones y modelos derivados de la geometría clásica griega. Una visión que enraíza con la consideración platónica de un mundo real consistente de formas euclídeas creadas por un ser superior. Pero el mundo real fue construido por un demiurgo que realizó algo menos

perfecto. Mandelbrot introdujo, en 1975, el término «fractal» (del latín *fractus* = roto, quebrado, irregular) para caracterizar fenómenos espaciales o temporales, que son continuos pero no diferenciales. Las propiedades fractales incluyen independencia escalar, auto-similitud, complejidad e infinitud en la descomposición del detalle. Las estructuras fractales no poseen una escala métrica única, y los procesos fractales no pueden caracterizarse mediante una escala temporal única. Los procesos (ej., frecuencia cardíaca) y los sistemas (ej., árbol bronquial) se caracterizan típicamente por los innumerables niveles de subestructura, todos ellos con idéntico patrón a lo largo de la cascada escalar decreciente (comportamiento iterativo). La geometría fractal proporciona un tema unificador en biología que permite la generalización de conceptos fundamentales en cuanto a medidas espaciales y temporales, pero no funcionales (FRAME & COL 2004; KENKEL & WALTER 1996; MANDELBROT 1982) (FIGURA 41).

«Un conjunto universal de reglas de construcción parece guiar el diseño de estructuras orgánicas —desde simples compuestos de carbono hasta complejas células y tejidos—. Esta frase encabeza *The Architecture of Life*, el trabajo de divulgación con el que Don Ingber presentó en sociedad su modelo de biotensegridad (INGBER 1998). La vida es el último ejemplo de complejidad en acción. Un organismo —una bacteria o un humano— se desarrolla a través de una serie increíblemente compleja de interacciones que involucran un vasto número de componentes diferentes (FIGURAS 42 Y 43). Tales componentes o subsistemas son, en sí mismos, productos de componentes más pequeños que, de manera independiente, exhiben su propio comportamiento dinámico como, por ejemplo, su capacidad de catalizar reacciones químicas (INGBER 2000). Sin embargo, cuando estos últimos componentes se integran en unidades funcionales de orden superior —una célula o un tejido— emergen propiedades nuevas e impredecibles: capacidad de moverse, de cambiar de forma y de crecer. Si bien las esperanzas para desentrañar el enigma descansan sobre el genoma y postgenoma, el puzzle no se resolverá a menos que se comprendan las reglas para su ensamblaje.

Que la naturaleza aplica reglas de ensamblaje universales está implícito en la recurrencia —desde la escala molecular a la macroscópica— de ciertos patrones como espirales y formas pentagonales o triangulares (CAMAZINE 2003). Tales patrones aparecen en estruc-

turas, aparentemente tan dispares, como cristales y proteínas, y en organismos tan diferentes como virus, plancton y humanos. Después de todo, la materia inorgánica y la orgánica están hechas con los mismos mimbres: átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno o fósforo. La única diferencia es cómo los diferentes átomos se disponen en el espacio tridimensional. Este fenómeno, en el que los componentes se organizan para formar estructuras estables de orden superior, que presentan nuevas propiedades (emergentes) impredecibles de las características de las partes individuales, se denomina autoensamblaje. Se observa en diferentes escalas de la naturaleza; en el cuerpo humano, por ejemplo, determinadas macromoléculas se autoensamblan en componentes celulares denominados orgánulos, que se autoensamblan en células, que lo hacen en tejidos, que se autoensamblan en órganos. El resultado es un cuerpo organizado jerárquicamente a modo de sistemas dentro de sistemas (COFFEY 1998).

En julio de 1940, Max Delbrück y Linus Pauling publicaron un ensayo en *Science* con el título «La naturaleza de las fuerzas operativas intermoleculares en los procesos biológicos» (PAULING & DELBRÜCK 1940) (FIGURA 44). Dos años antes, el físico alemán P Jordan

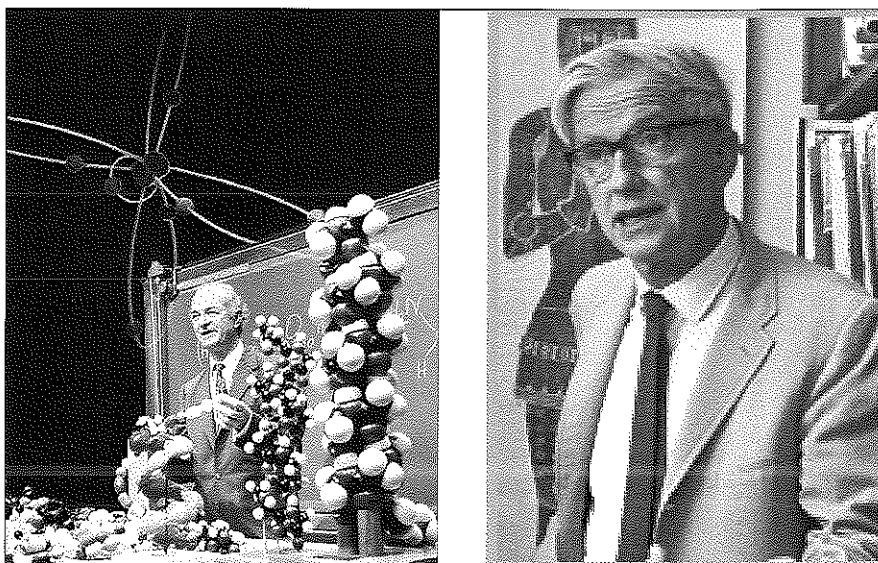


FIGURA 44. Linus C Pauling (1901-1994) PN Química 1954 y PN Paz 1962. Max Delbrück (1906-1981) PNF6M 1969.

había publicado varios artículos en los que proponía la idea de que existe una interacción estabilizadora mecanocuántica —el fenómeno de resonancia— que opera de manera preferente entre moléculas o parte de ellas, idénticas o cuasi idénticas; fenómeno que es capaz de influir sobre el proceso de síntesis molecular biológica, de tal manera que se forman réplicas de las moléculas que están presentes en la célula. Jordan utilizó la idea sugiriendo explicaciones de la reproducción de los genes, el crecimiento de los bacteriófagos, la formación de anticuerpos, y cualquier otro fenómeno biológico que muestre especificidad. La novedad de su trabajo residía en su sugerencia de que la resonancia mecanocuántica podría provocar la atracción entre moléculas que contuvieran el suficiente número de grupos idénticos para causar la reproducción autocatalítica de las moléculas. Delbrück y Pauling analizaron el argumento y señalaron que la estabilización por resonancia no es posible en los organismos vivos. Indicaron que la especificidad biológica debería resultar de la existencia de moléculas con estructuras complementarias, y que la autocatálisis, como ocurre en la duplicación de los genes, puede explicarse en términos de dos moléculas mutuamente complementarias.

En dos conferencias pronunciadas en 1948, una en la *Royal Institution* y otra en la *Sir Jesse Boot Foundation*, Pauling repitió y amplió sus argumentos (PAULING 1970): «Creo que el mismo mecanismo, dependiente de una estricta complementariedad en la estructura molecular, es responsable de toda la especificidad biológica... Creo que son la forma y el tamaño moleculares, a escala atómica, más que las propiedades químicas ordinarias de las sustancias, las involucradas en los fenómenos de autorreplicación... Creo que el mismo proceso de moldear un material plástico en una configuración complementaria al de otra molécula que sirve de molde, es responsable de toda la especificidad biológica. Creo que los genes sirven de moldes sobre los que se moldean las enzimas que son responsables de los caracteres químicos de los organismos, y que ellos también sirven como moldes para la producción de réplicas de ellos mismos. Se desconoce el detalle de los mecanismos por los que un gen o un virus producen réplicas de ellos mismos... Si la estructura que sirve de molde (el gen o la molécula viral) consta, por ejemplo, de dos partes cuyas estructuras son complementarias entre sí, cada una de esas partes puede servir de molde para la reproducción y réplica de la otra parte, y el complejo

de las dos partes complementarias puede servir de molde para la producción de duplicados de sí mismas.»

Biotensegridad: teoría y datos experimentales

La teoría celular de tensegridad fue, inicialmente, un modelo intuitivo, utilizándose estructuras tensegridales pre-estresadas, construidas de palillos y de gomas elásticas para visualizar el concepto. Sin embargo, tan simples construcciones remedaban fielmente el comportamiento celular (STAMENOVIC & INGBER 2002; STAMENOVIC & COL 2003). Por ejemplo, la célula y su núcleo, en un modelo esférico de tensegridad, se comportan de manera coordinada: cuando la célula se adhiere a una superficie rígida, el núcleo se desplaza hacia la base (se polariza), tal como sucede en una célula en cultivo (SIMS & COL 1992; VOLOKH & COL 2000, 2002) (FIGURA 45). La formulación matemática del modelo de tensegridad celular representó el salto cualitativo que afianzó la teoría. La primera formulación teórica del modelo asentó la idea de que la arquitectura (la disposición espacial de los elementos de soporte) y el pre-estrés (el nivel de tensión isométrica) en el citoesqueleto son las llaves para que la célula sea capaz de estabilizar su forma (WENDING & COL 1999, 2002). El análisis conjunto de los estos resultados obtenidos señala que la formulación actual de la teoría celular de tensegridad, a partir de modelos todavía simples, predice con eficacia numerosos comportamientos mecánicos estáticos y, más sorprendente, insinúa ciertos comportamientos dinámicos (STAMENOVIC & COL 1996).

Está bien establecido que la forma celular es importante para la función de las células adheridas (HORWITZ & PARSONS 1999). Numerosos estudios apuntan a que fuerzas mecánicas a nivel del citoesqueleto juegan un importante papel regulador. Se han propuesto diversos modelos mecánicos microestructurales del citoesqueleto para explicar cómo tales fuerzas inducen la distorsión del perfil celular: entramados esponjosos abiertos, redes de cables pre-estresados y modelos tensegridales (FIGURA 46). Estos modelos utilizan diferentes mecanismos microestructurales para resistir la deformación (CANADAS & COL 2002; COUGHLIN & STAMENOVIC 1997, 1998, 2003; HEIDEMANN & COL 2000; INGBER & COL 2000; STAMENOVIC & COUGHLIN 1999, 2000). Los primeros son redes de barras interconectadas (ej., esponja de poli-

retano) que asumen que el citoesqueleto de actina es un entramado de segmentos elásticos interconectados, que pandean cuando la célula se deforma. Para este modelo, el módulo de Young (o módulo de elasticidad: relación entre la fuerza por unidad de superficie que actúa sobre un cuerpo y la deformación relativa que produce) del citoesqueleto de actina viene dado por la relación: $E^* = CE\phi^2$; [C= constante, ~ 1 para diferentes materiales esponjosos; E = módulo de Young de un filamento individual de actina; ϕ = relación entre las densidades de las masas del entramado de filamentos de actina (ρ^*) y un filamento individual de actina (ρ), $\phi = \rho^*/\rho$]. El valor encontrado, tras introducir las medidas obtenidas experimentalmente, es: $E^* \simeq 10^4$ Pa, una cuantía que se ubica en el rango medio de los valores obtenidos experimentalmente.

Las redes de cables pre-estresados son estructuras reticuladas que soportan una tensión inicial que confiere estabilidad a la forma de la estructura (STAMENOVIC & COL 2002, 2002a; WANG & COL 2002). En este modelo los filamentos de actina del citoesqueleto juegan el papel de cables que no pandean ni se acortan durante la deformación de la célula. La tensión inicial tiene un componente activo y dependiente de ATP a través del aparato de actomiosina, y otro pasivo dependiente de la presión osmótica del citoplasma (turgor) y de la reptación de la célula. Esta tensión está compensada por otras estructuras intracelulares (ej., microtúbulos) y por fuerzas de reacción de la matriz extracelular a través de las placas de adhesión. El pre-estrés (σ) de la red de cables tensados puede definirse como la fuerza total transmitida por los cables a través de un área seccional transversal, por unidad de área, en dirección normal al área. El presente modelo proporciona un valor de $E^* \simeq 10^1$ - 10^2 Pa, que se sitúa en el rango inferior de las medidas experimentales. Una clase especial de redes de cables pre-estresados son las estructuras tensegridales, en las que la tensión del cableado está completamente amortiguada por segmentos rígidos que soportan compresión, que remedan las estructuras diseñadas por K Snelson y que D Ingber aplicó al contexto celular. Los valores son similares a los del modelo anterior: $E^* \simeq 10^2$ Pa. Los modelos de cableado pre-estresado son representativos del comportamiento celular ante estímulos mecánicos pequeños, mientras que los modelos abiertos lo son ante grandes compresiones mecánicas. El modelo que considera la naturaleza discreta del citoesqueleto, frente a la interpretación de una mecánica celular sobre la base de una

mecánica continua, permite interpretar las deformaciones y distorsiones celulares a partir de los primeros principios de la mecánica. El citoesqueleto se extiende desde la membrana celular al núcleo, asegurando una estabilidad celular sobre la base de un balance entre la tensión generada en los microfilamentos contráctiles y la compresión resistida por los microtúbulos (CHICUREL & COL 1998; WANG & STAMENOVIC 2000; WANG & COL 2001).

Huesos, músculos y tendones utilizan tenseguridad para autoestabilizarse. El corazón y los pulmones son estructuras pre-estresadas sobre la base de fuerzas de distensión (fuerza hemodinámica y presión de aire). Las arquitecturas neurales cerebral y de la retina o la del cristalino están también gobernadas por fuerzas tisulares internas, en este caso generadas en el citoesqueleto de sus células constitutivas (JOSHI & COL 1985; YAMADA & COL 2000). Las fuerzas en esos tejidos y órganos están soportadas por una rígida MEC y por fuerzas de contracción opuestas generadas por células vecinas (BUTLER & COL 2002). Por ello se separan los bordes de una herida o colapsa una estructura anatómica al ser lesionada. Pero la jerarquía tensegridal no acaba en el nivel celular. El citoesqueleto interno, que se comporta como una estructura de tenseguridad, se conecta con el citoesqueleto submembranar, en la periferia celular, y con el andamiaje nuclear, en el centro de la célula; una estructura que se extiende por toda la célula gobernando múltiples funciones básicas (KLYMKOWSKY 1999) (FIGURA 47). Las tres estructuras tensegridales subcelulares —citoesqueletos submembranar e interno, y el núcleo— pueden actuar de manera independiente, pero cuando se acoplan mecánicamente funcionan como un sistema tensegridal jerarquizado (FIGURA 48). Ello hace que la compleja estructura de la cromatina, donde ADN e histonas protegen códigos genético y epigenético, pudiera incorporar un tercer código, tensegridal, regulado por la interacción entre el citoesqueleto interno y el andamiaje nuclear (HUANG & INGBER 1999; INGBER 1993; JULIANO & HASKILL 1993; MANIOTIS & COL 1997). En resumen, el modelo de tenseguridad celular ha incorporado el concepto que células, tejidos y otras estructuras biológicas de mayor y menor tamaño, exhiben comportamiento mecánico integrado sobre la base de compartir una arquitectura de tenseguridad. El reconocimiento de que la naturaleza utiliza estructuras pre-estresadas y geodésicas a escalas celular y subcelular sugiere que las estructuras de tenseguridad son manifestaciones de un principio de diseño común (INGBER 2003, 2003a) (FIGURA 49).

Biotensegridad: *¿un nuevo paradigma?*

Hasta ahora, biología y medicina se han esforzado en identificar los componentes moleculares —desde la perspectiva química— que comprometen la vida, siendo el análisis del genoma la meta. El reto es, sin embargo, comprender como emergen los comportamientos celulares, tisulares u orgánicos a partir de interacciones colectivas entre una multitud de componentes moleculares que proporcionan genoma y proteoma; ello exige describir los procesos moleculares integrados en sistemas jerarquizados (MEYER & COL 2000). Otra tendencia es el resurgimiento del interés por las fuerzas mecánicas más que por las reacciones químicas, como reguladores biológicos. Los clínicos reconocen la importancia de las fuerzas mecánicas en el desarrollo y función del corazón y los pulmones, de los crecimientos cutáneo y muscular, del mantenimiento de huesos y cartílagos, en la etiología de varias enfermedades degenerativas como hipertensión, osteoporosis, asma o insuficiencia cardíaca, o en patologías iatrogénicas como la consecutiva a ventilación asistida (INGBER 2002; PINHU & COL 2003). Todo ello lleva a considerar cómo las vías moleculares de transducción de señales funcionan en el contexto físico de las células y los tejidos; o cómo una fuerza física —un estrés mecánico aplicado a la MEC o una distorsión celular— cambia las actividades químicas celulares o controla el desarrollo tisular (GUDI & COL 1998). La contestación hay que buscarla en la biofísica molecular; pero sin dejar de lado una perspectiva arquitectónica que asume interacciones multimoleculares jerarquizadas.

Una parte considerable de la maquinaria metabólica celular opera en un estado sólido: moléculas involucradas en el metabolismo intermediario, en procesos de biosíntesis de macromoléculas o en la transducción de señales, se encuentran inmovilizadas sobre el entramado de proteínas citoesqueléticas, adaptadoras y de anclaje (HALL & LEFKOWITZ 2002; PAWSON & NASH 2003; PAWSON & SCOUT 1997). Esta bioquímica de estado sólido difiere del punto de vista convencional de la regulación y del control —homeostasis y cambio— celulares, pues este modelo no contempla fenómenos de difusión sino que las actividades bioquímicas y genético-moleculares se regulan independientemente de aquellos procesos que actúan libremente en el citosol (FIGURA 50). De este modo, la utilización combinada, sinérgica, de tensegridad y mecanobioquímica de estado sólido por la célula

puede, mediante mecanotransducción, integrar las diversas señales, físicas y químicas, que son responsables del comportamiento celular global. La esfera icosadodecaedro de Chuck Hoberman —un tensegrijuguete *superstar*— permite, sobre la base de un mecanismo cinemático, la expansión y la contracción coordinadas que cambian el perfil global sin alterar la integridad de la red constitutiva (FIGURA 51). Ello merced a la inclusión de mecanismos tñjera que permiten el plegamiento y la extensión sincrónicas; un mecanismo que sugiere un modelo del plegamiento y de la desnaturalización de las proteínas. Para Hoberman, la transformación es una nueva frontera de diseño; una propiedad innata de cambio controlado. Un objeto transformante se pliega, retrae o se torna rígido; tal son los fenómenos de diapédesis, engullimiento o adhesión leucocitarios (HOBERMAN WWW) (FIGURA 52).

Biotensegridad: *el soporte bioquímico*

En los metazoos (no existen homólogos en procariotes, plantas u hongos), las integrinas son protagonistas del entramado tensegridal (INGBER 1991; SHYY & CHIEN 1997). El término «integrina» fue acuñado en un artículo de revisión (HYNES 1987) para describir una familia de receptores heterodiméricos de la superficie celular —estructural, inmunquímica y funcionalmente emparentados— que integran la matriz extracelular con el citoesqueleto intracelular, a través de interacciones dependientes de iones metálicos, para mediar en la adhesividad y migración celulares (McDONALD 2000). Además, las integrinas, como verdaderos sensores de la MEC (MARTIN & COL 2002), al realizar conexiones transmembranares con el citoesqueleto activan numerosas vías de señales intracelulares en un proceso que exige la participación de diferentes colaboradores (BOUDREAU & JONES 1999; VOGEL & BANEYX 2003; ZAMIR & GEIGER 2001). Las integrinas y sus ligandos juegan papeles claves en el desarrollo, respuesta inmune, tráfico leucocitario, hemostasia o cáncer, estando en el meollo de diversas enfermedades inflamatorias y hemorrágicas. Por su parte, son dianas farmacológicas frente a trombosis e inflamación, y son receptores para muchos virus y bacterias. Es importante destacar que las integrinas son receptores de adhesión que transmiten bidireccionalmente señales a través de la membrana plasmática (HYNES 2002), y que reorganizaciones en

los dominios extracelular, transmembranar y citoplásmico de las integrinas son responsables de diferentes respuestas celulares ante diversos estímulos mecánicos (JULIANO 2002). Ello significa que la señal detectada en uno de los extremos de la molécula es transmitida al lugar de acoplamiento con el ligando en el otro extremo molecular (matriz extracelular o citoesqueleto) situado a 10-20 nm. Tan astronómica nanodistancia es manejada mediante cambios alostéricos de largo alcance (XIAO & COL 2004).

Las integrinas son, con diferencia, los enlaces más estables y robustos de la interfaz entre la célula y la MEC. Pero el acoplamiento mecánico entre ambas estructuras exige la formación de una estructura de mayor complejidad: el complejo de adhesión focal, una superestructura que acopla mecánicamente a las integrinas con el citoesqueleto. Una serie de moléculas adaptadoras (vinculina, talina, paxilina, actinina, etc) y de quinasas (de adhesión focal, regulada por señal extracelular, etc) integran tal complejo (CHEN & COL 2004) (FIGURA 53). Con todo ello, queda aún mucho trabajo para crear una teoría consistentemente coherente de la mecanotransducción (KATSUMI & COL 2004). Cuestiones todavía sin resolver se refieren a la naturaleza de los mecanosensores; cómo se determina la forma celular; cómo interactúan los diferentes mecanismos y moléculas de adhesión; cómo la fuerza generada por la célula puede gobernar la estructura y la organización de la MEC, y cómo la mecanotransducción dirige el perfil del núcleo, reorganiza la cromatina y trastoca físicamente la accesibilidad génica a complejos transcripcionales. Habrá que esperar al desarrollo de la nanotecnología para poder acceder al estudio micromecánico intracelular de manera directa (CHEN & COL 2004).

Resumen

La tensegridad enseña que ni las moléculas ni sus interacciones deben considerarse ni individual ni independientemente; que el comportamiento biológico debe explicarse a partir de ensamblajes supra-moleculares y arquitecturas de orden superior. La tensegridad también pone de manifiesto que las estructuras complejas jerarquizadas exhiben comportamientos mecánicos integrados. Además, mecanismos de control son innatos al diseño tensegridal. Todo ello hace que

la tensegridad representa, hoy, el ¿penúltimo? ingrediente en la jerárquica superorganización biológica (FIGURA 54). Sin duda, un escalón más en la comprensión de la complejidad del mundo viviente; un escenario en el que es posible integrar biomatemáticas y biología experimental (WEISS & COL 2003). Esta interacción revela cómo comportamientos robustos —por ej., rigidez mecánica y estabilidad de forma— pueden generarse a partir de componentes en principio inconexos —por ej., filamentos moleculares flexibles—, algo que es un hecho distintivo de los entramados complejos y de los sistemas vivos (CSETE & DOYLE 2002). Resulta interesante observar —señala Ellices— como naturalismo y funcionalismo pueden converger cuando se plantean problemas similares (ELICES 2004).

Con todo ello, arquitectura de materiales y arquitectura de información (mecanismos de control) aparecen determinados conjuntamente en las estructuras tensegridales; ello porque son innatas en el diseño, justamente cómo sucede en las células vivas. Así, la tensegridad puede representar el hardware de los sistemas vivos. Pero ¿y el software? Ello conduce al problema de cómo el entramado estructural afecta las redes de procesamiento de información en el contexto celular, donde tensegridad parece ejercer su efecto sobre la integración de la señal. Los experimentos muestran que aunque la célula pueda recibir múltiples entradas simultáneas, aquella entidad es capaz de integrarlas con rapidez para producir sólo uno de unos pocos fenotipos posibles (por ej., quiescencia, crecimiento, movimiento, apoptosis). Pero estudios de mecanotransducción provocan una cuestión fundamental: cómo un cambio gradual en un parámetro físico de gran envergadura —por ej., perfil celular— puede conducir a diferentes destinos celulares. Los biólogos suelen contemplar la transducción de señales en términos de vías lineales de señalización que conducen a una salida particular. Sin embargo, la información vehiculada por la maquinaria de transducción de señales se distribuye, la mayoría de las ocasiones, entre numerosas vías, de tal manera que un mismo estímulo puede generar respuestas diferentes. El concepto de vías lineales de señalización es inapropiado (COFFEY 1998; STROHMAN 1997).

La observación que variaciones graduales en un parámetro de control (perfil celular) puede inducir la elección celular entre distintos programas génicos (destino celular) es reminiscencia de una transición de fases en física. Por ejemplo, cambios graduales en temperatura

producen modificaciones macroscópicas abruptas entre estados estables cualitativamente discretos (por ej., líquido vs gas o sólido). Diferentes autores han explorado la posibilidad de que los destinos celulares puedan contemplarse como estados celulares, que los cambios entre esos estados puedan representar transiciones de fase biológicas y que los destinos celulares sean interpretados como programas terminales comunes o atractores que inducen auto-organización en el entramado regulador de la dinámica celular (HUANG 1999; HUANG & INGBER 2000). La formación de atractores es una propiedad emergente que depende de restricciones dinámicas impuestas por las interconexiones funcionales del hardware (interacciones gen-gen, gen-proteína o proteína-proteína), un modelo utilizado hace tiempo por el biólogo teórico Waddington y reelaborado por Renè Thom en su teoría de catástrofes (THOM 1975; WADDINGTON 1956). La posibilidad de que existan atractores en el entramado de procesamiento de información celular se apoya en la observación apuntada de que varios estímulos que activan múltiples proteínas puedan inducir idénticos fenotipos celulares. En resumen, quizás el mayor impacto del modelo de tensegridad es que ayuda a cambiar el escenario de referencia de la biología celular. El reto es utilizar tales herramientas para comprender mejor el comportamiento celular y aproximar este enfoque a otros igualmente correctos con la finalidad de conseguir una descripción unificada de los procesos de regulación biológica (INGBER 2003a).

Los principios expuestos, ¿son universales?, ¿son aplicables al mundo de los ilimitadamente grande y al de lo muy, muy pequeño? No lo sabemos. Snelson ha propuesto un modelo atómico de tensegridad sobre la base de las ideas de Louis de Broglie. El mismo Fuller habló de movimiento planetario en términos de tensegridad gravitatoria. Quizás, sueña Ingber, un tema único impregna la Naturaleza. Como sugirió el zoólogo escocés D'Arcy Thompson, en los comienzos del siglo XX, quién refiriéndose a Galileo quién, a su vez, había citado a Platón: es probable que el libro de la naturaleza haya sido escrito en el lenguaje de la Geometría (FIGURA 55).

Debo concluir, y concluyo como empecé, agradeciendo afectuosamente a la Real Academia de Doctores su generosidad por acogerme entre sus ilustres miembros. He dicho.

PAZ y BIEN.

Bibliografía

- Alenghat FJ & Ingber DE (2002) Mechanotransduction: All signal point to cytoskeleton, matrix, and integrins. *Science's stke* 119/pe6
- Applewhite EJ (1995) The naming of Buckminsterfullerene. En: *The Chemical Intelligencer* - vol 1, no 3 (I Hargittai, ed). Springer-Verlag: Nueva York. En: <http://www.inetarena.com/~pdx4d/synergetica/eja1.html>
- Bauhaus Dessau Foundation. *Bauhaus*. En: <http://www.bauhaus-dessau.de>
- Boudreau NJ & Jones PL (1999) Extracellular matrix and integrin signalling: the shape of things to come. *Biochem J* 339: 481-488
- Britton S & Collins D, eds (2003) *The Eighth Day. The Transgenic Art of Eduardo Kac*. Institute for Studies in the Arts. Herberger College of Fine Arts. Arizona State University
- Brookes, M (1999) Hard cell, soft cell. *New Scientist* 164: 41-46
- Buckminster Fuller R (1961) Tensegrity. *Portfolio Artnews Annual* 4: 112-127
- Buckminster Fuller R (1965) Conceptuality of fundamental structures. En: *Structure in Art & in Science* (G Kepes, ed) Braziller: Nueva York. Pp 66-88.
- Buckminster Fuller R (1979) Synergetics. En: *Portfolio* (R Buckminster Fuller & LC Keat, eds) Philadelphia & Singapore
- Buckminster Fuller R & Applewhite EJ (1997) Synergetics. Explorations in the geometry of thinking. Estate of R Buckminster Fuller. Publicado por Macmillan Co Inc, 1975 y 1979. En: <http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/synergetics.html>. 700.01. Definition: Tensegrity
- Buckminster Fuller Institute. The Buckminster Fuller Institute. En: <http://www.bfi.org.html>
- Burkhardt RW (2004). *A Practical Guide to Tensegrity Design*, 2nd ed. En: <http://www.channell.com/users/bobwb/tenseg/book/revisions.html>
- Burridge K, Chrzanowska-Wodnicka M (1996) Focal adhesions, contractility, and signalling. *Annu Rev Cell Dev Biol* 12: 463-519
- Butcher J A, Jr & Lamb GW (1984) The relationship between domes and foams: application of geodesic mathematics to micelles. *J Am Chem Soc* 106: 1217 -1220

- Butler J P, Tolic-Norrelykke IM, Fabry B & Fredberg J J (2002) Traction fields, moments, and strain energy that cells exert on their surroundings. *Am J Physiol Cell Physiol* 282: C595 -C605
- Calder Foundation. *Alexander Calder*. En: <http://www.calder.org>
- Calladine CR (1978) Buckminster Fuller's «tensegrity» structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames. *Int J Solids Structures* 14: 161-172
- Camazine S (2003) Patterns in Nature. *Nat Hist* 112: 34-41
- Canadas P, Laurent V M, Oddou C, Isabey D & Wendling S (2002) A cellular tensegrity model to analyse the structural viscoelasticity of the cytoskeleton. *J Theor Biol* 218: 155 -173
- Csete ME & Doyle JC (2002) Reverse engineering of biological complexity. *Science* 295: 1664-1669
- Chandrasekhar S (1987) *Truth and Beauty. Aesthetics and Motivations in Science*. The University of Chicago Press, Chicago
- Chen CS & Ingber DE (1999) Tensegrity and mechanoregulation: from skeleton to cytoskeleton. *Osteoarthritis Cartilage* 7: 81-94
- Chen CS, Mrksich M, Huang S, Whitesides G & Ingber DE (1997) Geometric control of cell life and death. *Science* 276: 1425-1428
- Chen CS, Tan J & Tien J (2004) Mechanotransduction at cell-matrix and cell-cell contacts. *Annu Rev Biochem Eng* 6: 275-302
- Chicurel M, Chen CS & Ingber DE (1998) Cellular control lies in the balance of forces. *Curr Opin Cell Biol* 10: 232 -239
- Coffey DS (1998) Self-organization, complexity and chaos: the new biology of medicine. *Nat Med* 4: 882-885
- Connelly R & Back A (1998) Mathematics and tensegrity. *Am Scientist* 86: 142-151
- Coughlin M F & Stamenovic D (1997) A tensegrity structure with buckling compression elements: application to cell mechanics. *ASME J Appl Mech* 64: 480-486
- Coughlin MF & Stamenovic D (1998) A tensegrity model of the cytoskeleton in spread and round cells. *ASME J Biomech Eng* 120:770 -777
- Coughlin MF & Stamenovic D (2003) A prestressed cable network model of the adherent cell cytoskeleton. *Biophys J* 84: 1328 -1366

- Dennerll TJ, Joshi HC, Steel VL, Buxbaum RE & Heidemann SR (1988) Tension and compression in the cytoskeleton II: quantitative measurements. *J Cell Biol* 107: 665 -664
- Edmondson AC. *A Fuller Explanation. The synergetic geometry of R Buckminster Fuller*. En: <http://www.angelfire.com/mt/marksomers/40.html>
- Elices M (1999) Materiales biológicos y biomateriales. En: Horizontes Culturales: Las Fronteras de la Ciencia. Real Academia de Ciencias, Madrid. Pgs 113-125
- Elices M (2003) Nanomateriales. *Rev R Acad Cienc Exact Fís Nat (Esp)* 97: 271-287
- Elices M (2004) *Los Gozos y las Formas. Reflexiones sobre la estética de las formas estructurales*. Discurso inaugural año académico 2004-2005. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
- Emmerich DG (1988) *Structures tendues et autotendantes*. Monographies de Géométrie Constructive. Editions de l'Ecole d'Architecture de Paris La Villette
- Emmerich DG (1996) Emmerich on self-tensioning structures. *Intern J Space Struct* 11: 29-36
- Fearnley CJ (1994) *The R. Buckminster Fuller FAQ*. En: <http://www.netaxs.com/~cjf/fuller-faq.html>
- Feynman R (1959) There's Plenty of Room at the Bottom. En: <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html>
- Frame M, Mandelbrot BB & Neger N (2004) Fractal geometry. En: <http://classes.yale.edu/Fractals>
- Freitas RA (1999) *Nanomedicine. Volume I: Basic capabilities*. Landes Bioscience, Austin.
- García-Añoveros J & Corey DP (1997) The molecules of mechanosensation. *Annu Rev Neurosci* 20: 567-594
- Gillespie PG & Walker RG (2001) Molecular basis of mechanosensory transduction. *Nature* 413: 194-202
- Goldberg J. The quivering bundles that let us hear – The goal: extreme sensitivity and speed & Tip links pull up the gates of ion channels (Seeing, hearing, and smelling the world. A report from the Howard Hughes Medical Institute). En: [www.hhmi.org/senses/c120 & c130.html](http://www.hhmi.org/senses/c120&c130.html)
- Goldstein JL (2002) Synergy and symbiosis à la Matisse-Picasso. *Nat Med* 8: 1053-1054

- Gudi S, Nolan JP & Frangos JA (1998) Modulation of GTPase activity of G proteins by fluid shear stress and phospholipid composition. *Proc Natl Acad Sci USA* 95: 2515-2519
- Guzmán M de (2002) Tensegridad: de la escultura a la célula. *Ars Médica Rev Humanidades* 1: 166-176
- Hall RA & Lefkowitz RJ (2002) Regulation of G-protein-coupled receptor signalling by scaffold proteins. *Circ Res* 91: 672-680
- Hanaor A (1997) Tensegrity: Theory and application. En: *Beyond the Cube. The architecture of space frames & polyhedra* (J François Gabriel, ed) John Wiley & Sons Inc: Nueva York. Pp 385-408
- Hoberman C. World of magic transformation. En: <http://www.hoberman.com/fold/main/index.htm>
- Heidemann S R, Lamoureux P & Buxbaum RE (2000) Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics. *J Appl Physiol* 89: 1670 -1678
- Horwitz AR & Parsons JT (1999) Cell migration-Movin'on. *Science* 286: 1102-1103
- Huang S (1999) Gene expression profiling, genetic networks and cellular states: an integrating concept for tumorigenesis and drug discovery. *J Mol Med* 77: 469-480
- Huang S & Ingber DE (1999) The structural and mechanical complexity of cell-growth control. *Nat Cell Biol* 1: E131-E138
- Huang S & Ingber DE (2000) Shape-dependent control of cell growth, differentiation, and apoptosis: switching between attractors in cell regulatory networks. *Exper Cell Res* 261: 91-103
- Hynes RO (1987) Integrins: a family of cell surface receptors. *Cell* 48:549-554
- Hynes RO (2002) Integrins: bidirectional, allosteric signalling machines. *Cell* 110: 673-387
- Ingber DE (1991) Integrins as mechanochemical transducers. *Curr Opin Cell Biol* 3: 841-848
- Ingber DE (1993) The riddle of morphogenesis: a question of solution chemistry of molecular cell engineering? *Cell* 75: 1249-1252
- Ingber DE (1993a) Cellular tensegrity: defining new rules of biological design that govern the cytoskeleton. *J Cell Sci* 104: 613 -627

- Ingber DE (1997) Tensegrity: the architectural basis of cellular mechano-transduction. *Annu Rev Physiol* 59: 575-599
- Ingber DE (1998) The architecture of life. *Sci Am* 278: 48 -57
- Ingber DE (1999) How cells (might) sense microgravity. *FASEB J* 13 (suppl): S3-S15
- Ingber DE (2000) The origin of cellular life. *Bioessays* 22: 1160 -1170
- Ingber DE (2002) Mechanical signalling and the cellular response to extracellular matrix in angiogenesis and cardiovascular physiology. *Circ Res* 91: 877-887
- Ingber DE (2003) Tensegrity I. Cell structure & hierarchical system biology. *J Cell Sci* 116: 1157-1173
- Ingber DE (2003a) Tensegrity II. How structural networks influence cellular information-processing networks. *J Cell Sci* 116: 1397 -1408
- Ingber DE, Heidemann SR, Lamoureux P & Buxbaum RE (2000) Opposing views on tensegrity as a structural framework for understanding cell mechanics. *J Appl Phys* 89: 1663-1678
- Ingber DE & Jamieson J D (1982) Tumor formation and malignant invasion: role of basal lamina. En: *Tumor Invasion and Metastasis* (LA Liotta & I R Hart, eds) Martinus Nijhoff: La Haya, Holanda. Pp 335 - 357
- Ingber DE & Jamieson JD (1985) Cells as tensegrity structures: architectural regulation of histodifferentiation by physical forces transduced over basement membrane. En: *Gene Expression During Normal and Malignant Differentiation* (LC Andersson, CG Gahmberg & P Eklom, eds) Academic Press: Orlando, Florida. Pp 13-32
- Ingber DE, Dike L, Hansen L, Karp S, Liley H, Maniotis A, McNamee H, Mooney D, Plopper G, Sims J & Wang N (1994) Cellular tensegrity: exploring how mechanical changes in the cytoskeleton regulate cell growth, migration, and tissue pattern during morphogenesis. *Int Rev Cytol* 150: 173 -224
- Janmey PA (1998) The cytoskeleton and cell signaling: component localization and mechanical coupling. *Physiol Rev* 78: 763 -781
- Joshi HC, Chu D, Buxbaum RE & Heidemann SR (1985) Tensión and compresión in the cytoskelenton of PC 12 neurites. *J Cell Biol* 101: 697-705
- Juliano RL (2002) Signal transduction by cell adhesion receptors and the cytoskeleton: Functions of integrins, cadherins, selectins, and immuno-

- globulin-superfamily members. *Annu Rev Pharmacol Toxicol* 42: 283-323
- Juliano RL & Haskill S (1993) Signal transduction from the extracellular matrix. *J Cell Biol* 120: 577-585
- Kaczanoska J, Ifode F, Jeanmairewolf R, Clerot JC, Kiersnowska M & Adoutte A (1995) Tensegrity model of pattern formation during cytokinesis of a ciliate, paramecium — effects of an inhibitor of phosphorylation. *J Exp Zool* 273: 494 -510
- Katsumi A, Orr AW, Tzima E & Schwartz MA (2004) Integrins in mechanotransduction. *J Biol Chem* 279: 12001-12004
- Kaverina I, Krylyshkina O, Beningo K, Anderson K, Wang YL & Small JV (2002) Tensile stress stimulates microtubule outgrowth in living cells. *J Cell Sci* 115: 2283 -2291
- Kenkel NC & Walker DJ (1996) Fractals in the biological sciences. En: <http://www.umanitoba.ca/faculties/science/botany/labs/ecology/fractals/fractal.html>
- Klymkowsky MW (1999) Weaving a tangled web: the interconnected cytoskeleton. *Nat Cell Biol* 1: E121-E123
- Lalvani H, ed (1996) Origins of Tensegrity: Views of Emmerich, Fuller and Snelson. *Intern J Space Struct* 11: 27
- Leonardo on-line. Moët Hennessey-Louis Vuitton Science for Art Prize. Genesis of forms: Biology and biomimetism. En: <http://mitpress2.mit.edu/e-journals/Leonardo>
- Levin SM (1982) Continuous tension, discontinuous compression. A model for biomechanical support of the body. *Bull Struct Integr* 8 (1). En: <http://www.biotensegrity.com/paper2.html>
- Levin SM (1995) The importance of soft tissues for structural support of the body. *Spine: State of the Art Reviews* (T Dorman, ed) 9 (2). En: <http://www.biotensegrity.com/paper3.html>
- Levin SM (1997) A different approach to the mechanics of the human pelvis: tensegrity. En: *Movement, Stability & Low Back Pain* (A Vleeming, V Mooney, T Dorman, C Snijders & R Stoeckart, eds). Churchill Livingstone: Londres. Pp 157-167
- Littlewood Evans A & Müller U (2000) Stereocilia defects in the sensory hair cells of the inner ear in mice deficient in integrin $\alpha 8 \beta 1$. *Nat Genet* 24: 424-428

- Lynch ED, Lee MK, Morrow JE, Welchs PL, León PE & King M-C (1997) Nonsyndromic deafness DFNA1 associated with mutation of a human homolog of the *Drosophila* gene *diaphanous*. *Science* 278: 1315-1318
- Mandelbrot B (1982) *The Fractal Geometry of Nature*. W H Freeman & Co, Nueva York. Traducción al castellano (*La Geometría Fractal de la Naturaleza*) por Josep Llosa para Tusquest Editores: Metatemas. Libros para pensar la Ciencia. Barcelona, 1997
- Maniotis A, Chen C & Ingber DE (1997) Demonstration of mechanical connections between integrins, cytoskeletal filaments and nucleoplasm that stabilize nuclear structure. *Proc Natl Acad Sci USA* 94: 849 -854
- Marks RW (1960) *The Dymaxion World of Buckminster Fuller*. Southern Illinois University Press, Carbondale.
- Martin KH, Slack JK, Boerner SA, Martin CC & Parsons JT (2002) Integrin connections map: to infinity and beyond. *Science* 296: 1652-1653
- McDonald JA, ed (2000) Integrins minireviews series. *J Biol Chem* 275: 21783; 21785-8; 22607-10; 23409-12;
- Merkle R. Nanotechnology. En: <http://www.zyvex.com/nano>
- Meyer CJ, Alenghat FJ, Rim P, Fong JH-J, Fabry B & Ingber DE (2000) Mechanical control of cyclic AMP signalling and gene transcription through integrins. *Nat Cell Biol* 2: 666-668
- Molina A & Landa K, eds (2000) *Futuros Emergentes. Arte, Interactividad y Nuevos Medios*. Colec Formas Plásticas 7. Institució Alfons el Magnànim, Valencia
- Moravcsik MJ (1974) Scientists and artists: Motivations, aspirations, approaches and accomplishments. *Leonardo* 7: 255-259
- Moreno RF (1999) Sculptures by Faló. En: <http://mypage.direct.ca/o/olaf/crescentmoon.html>
- Motro R (1992) Tensegrity systems: The state of the art. *Intern J Space Struct* 7: 75-83
- Motro R (2003) History and definitions. En: *Tensegrity. Structural system for the future*. Kogan Page Science: Londres
- Newfoundland Deltaport. *The Newfoundland Deltaport*. En: <http://home.thezone.net/~deltaport/>
- Paramio JM & Jorcano JL (2002) Beyond structure: do intermediate filaments modulate cell signalling? *BioEssays* 24: 836-844

- Pauling L (1970) Fifty years of progress in structural chemistry and molecular biology. *Daedalus* 90: 988-1014
- Pauling L & Delbrück M (1940) The nature of the intermolecular forces operative in biological system. *Science* 92: 77-79
- Pawson T & Nash P (2003) Assembly of cell regulatory systems through protein interaction domains. *Science* 300: 445-452
- Pawson T & Scott JD (1997) Signaling through scaffold, anchoring, and adaptor proteins. *Science* 278: 2075-2080
- Pienta KJ & Coffey DS (1991) Cellular harmonic information transfer through a tissue tensegrity-matrix system. *Med Hypotheses* 34: 88-95
- Pienta K J, Getzenberg R H & Coffey DS (1991) Cell structure and DNA organization. *Crit. Rev Eukary Gene Express* 1: 355 -385
- Pines M. *Seen, hearing, and smelling the world*. A Report form HHMI. En: <http://www.hhmi.org/senses/a110.html>.
- Pinhu L, Whitehead T, Evans T & Griffiths M (2003) Ventilator-associated lung injury. *Lancet* 361: 332-339
- Pippel S. *Cellular tensegrity. A framework of cell mechanics?* En: <http://carol.wins.uva.nl/~svenp>
- Price MP, Lewin GR, McIlwrath SL, Cheng C, Xie J, Heppenstall PA & col (2000) The mammalian sodium channel BNC1 is required for normal touch sensation. *Nature* 407: 1007-1011
- Pugh A (1976) *An introduction to tensegrity*. University of California Press, Berkeley
- Roco MC & Bainbridge WS, eds (2001) *Societal implications of Nanoscience and Nanotechnology*. NSF. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- Ryan TJ (1989) Biochemical consequences of mechanical forces generated by distention and distortion. *J Am Acad Dermatol* 21: 115 -130
- Sadao S (1996) Fuller on tensegrity. *Intern J Space Struct* 11: 37-42
- Satcher R L, Jr & Dewey CF, Jr (1996) Theoretical estimates of mechanical properties of the endothelial cell cytoskeleton. *Biophys J* 71: 109 -118
- Shyy JY-J & Chien S (1997) Role of integrins in cellular responses to mechanical stress and adhesion. *Curr Opin Cell Biol* 9: 707-713

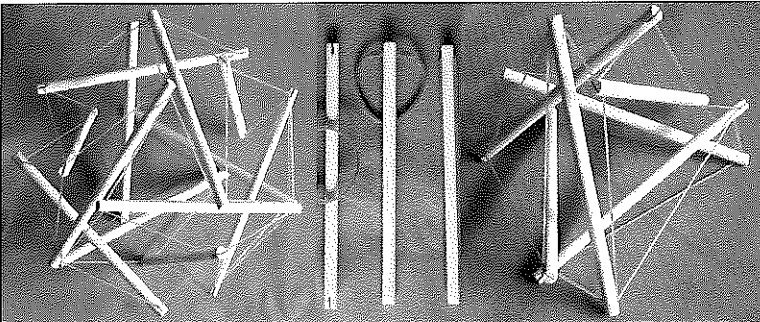
- Sieden LS (1989) The birth of the geodesic dome; how Bucky did it. *Futurist* 23: 14-19
- Sims J, Karp S & Ingber DE (1992) Altering the cellular mechanical force balance results in integrated changes in cell, cytoskeletal, and nuclear shape. *J Cell Sci* 103: 1215 -1222
- Singhvi R, Kumar A, Lopez GP, Stephanopoulos GN, Wang DIC, Whitesides GM & Ingber DE (1994) Engineering cell shape and function. *Science* 264: 696-698
- Skelton RE, Helton JW, Adhigari R, Pinaud J-P y Chan W (2001). *An Introduction to the Mechanics of Tensegrity Structures*. En: <ftp://osiris.ucsd.edu/pub/helton/tensegrity.pdf>
- Snelson K. Not in My Life. *Snelson's autobiography* (unpublished) En: <http://www.teleport.com/~pdx4d/docs/autobio.html>
- Snelson K (1996) Snelson on the tensegrity invention. *Intern J Space Struct* 11: 43-48
- Snelson K. *Kenneth Snelson*. En: <http://www.kennethsnelson.net>
- Srinivasan MA, Biggs SJ, Raju BI, De S, Cysyk JP, Gidwani AC & LaMotte RH () Role of skin biomechanics in mechanoreceptor response. En: <http://touchlab.mit.edu/oldresearch/currentwork/humanhaptics/roleofskinbiomechanics/>
- Stamenovic D & Coughlin MF (1999) The role of prestress and architecture of the cytoskeleton and deformability of cytoskeletal filaments in mechanics of adherent cells: a quantitative analysis. *J Theor Biol* 201: 63-74
- Stamenovic D & Coughlin MF (2000) A quantitative model of cellular elasticity based on tensegrity. *ASME J Biomech Eng* 122: 39-43
- Stamenovic D, Fredberg J, Wang N, Butler J & Ingber D E (1996) A microstructural approach to cytoskeletal mechanics based on tensegrity. *J Theor Biol* 181: 125 -136
- Stamenovic D & Ingber DE (2002) Models of cytoskeletal mechanics and adherent cells. *Biomech Model Mechanobiol* 1: 95 -108
- Stamenovic D, Liang Z, Chen J & Wang N (2002) Effect of the cytoskeletal prestress on the mechanical impedance of cultured airway smooth muscle cells. *J Appl Physiol* 92: 1443 -1450
- Stamenovic D, Mijailovich S M, Tolic-Norrelykke IM, Chen J & Wang N (2002a) Cell prestress. II. Contribution of microtubules. *Am J Physiol Cell Physiol* 282: C617-C624

- Stamenovic D, Mijailovich SM, Tolic-Norrelykke IM & Wang N (2003) Experimental tests of the cellular tensegrity hypothesis. *Biorheol* 40: 221 -225
- Strohman RC (1997) The coming Kuhnian revolution in biology. *Nat Biotechnol* 15: 194-200
- Tensegritoy. En: <http://www.tensegritoy.com>
- Thom R (1975) *Structural Stability and Morphogenesis. An outline of a general theory of models*. WA Benjamin Inc, Reading MA.
- Tibert AG & Pellegrino S. Review of form-finding methods for tensegrity structures. En: http://www_civ.eng.cam.ac.uk/dsl/tensegrity.pdf
- Tibert AG & Pellegrino S. *Form-finding of tensegrity systems-A review*. En: <http://www2.mech.kth.se/~gunnart/NSCMI4.pdf>
- Urner K. Synergetics on the web. En: <http://www.grunch.net/synergetics>
- Vogel V & Baneyx G (2003) The tissue engineering puzzle: a molecular perspective. *Annu Rev Biomed Eng* 5: 441-463
- Volokh KY, Vilnay O & Belsky M (2000) Tensegrity architecture explains linear stiffening and predicts softening of living cells. *J Biomech* 33: 1543 -1549
- Volokh KY, Vilnay O & Belsky M (2002) Cell cytoskeleton and tensegrity. *Biorheol* 39: 63 -67
- Waddington CH (1956) *Principles of Embriology*. Allen & Unwin Ltd, Londres
- Wang N, Butler J P & Ingber D E (1993) Mechanotransduction across the cell surface and through the cytoskeleton. *Science* 260: 1124-1127
- Wang N & Ingber DE (1994) Control of cytoskeletal mechanics by extracellular matrix, cell shape, and mechanical tension. *Biophys J* 66: 2181 -2189
- Wang N, Naruse K, Stamenovic D, Fredberg J, Mijailovic SM, Maksym G, Polte T, Ingber DE (2001) Mechanical behavior in living cells consistent with the tensegrity model. *Proc Natl Acad Sci USA* 98: 7765 -7770
- Wang N & Stamenovic D (2000) Contribution of intermediate filaments to cell stiffness, stiffening, and growth. *Am J Physiol Cell Physiol* 279: C188 -C194
- Wang N, Tolic-Nørrelykke IM, Chen J, Mijailovich SM, Butler JP, Fredberg JJ & Stamenovic D (2002) Cell prestress. I. Stiffness and prestress

- are closely associated in adherent contractile cells. *Am J Physiol Cell Physiol* 282: C606 -C616
- Watson PA (1991) Function follows form: generation of intracellular signals by cell deformation. *FASEB J* 5: 2013-2019
- Weinbaum S, Zhang X, Han Y, Vink H & Cowin SC (2003) Mechanotransduction and flow across the endothelial glycocalyx. *Proc Natl Acad Sci USA* 100: 7988-7995
- Weiss JN, Qu Z & Grafinkel A (2003) Understanding biological complexity: lessons from the past. *FASEB J* 17: 1-6
- Wendling S, Oddou C & Isabey D (1999) Stiffening response of a cellular tensegrity model. *J Theor Biol* 196: 309 -325
- Wendling S, Canadas P, Oddou C & Meunier A (2002) Interrelations between elastic energy and strain in a tensegrity model: contribution to the analysis of the mechanical response in living cells. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* 5: 1-6
- Whitford F (1984) *Bauhaus*. Thames and Hudson, Londres. Traducción al castellano de José Luis Fernández-Villanueva para Ediciones Destino SA, Barcelona, 1991
- Xiao T, Takagi J, Coller BS, Wang J-H & Springer TA (2004) Structural basis for allostery in integrins and binding to fibrinogen-mimetic therapeutics. *Nature* 432: 59-67
- Yamada T, Richiert D, Tumminia SJ & Russel P (2000) The tensegrity model applied to the lens: a hypothesis for the presence of the fiber cell ball and sockets. *Med Hypotheses* 55: 36 -39
- Zamir E & Geiger B (2001) Molecular complexity and dynamics of cell-matrix adhesions. *J Cell Biol* 114: 3583-3590.



FIGURA 1. **Pablo Picasso** (1881-1973): *Autorretrato con paleta* (1906), en Filadelfia Museum of Art, Colección Gallatin; *Mandolina y guitarra* (1924), en The Solomon R Guggenheim Museum, Nueva York. **Henri Matisse** (1869-1954): *Autorretrato* (1906), en Statens Museum for Kunst, Colección Rump, Copenhague; *Armonía en amarillo* (1928), en Colección Sandblom, Lund, Suecia.



PATENTES

inventor	título	presentada	concedida
RB Fuller	<i>Tensile-Integrity structures</i>	31 ago 1959	13 nov 1962
KD Snelson	<i>Continuous tension, discontinuous compression structures</i>	14 mar 1960	14 mar 1965
DG Emmerich	<i>Construction de réseaux autotendants</i>	10 abr 1963	28 sep 1964

FIGURA 4. Un sistema de tensegridad es aquel que se encuentra en un estado estable de autoequilibrio, y que consta de un conjunto discontinuo de componentes de compresión dentro de un sistema continuo de componentes de tensión.

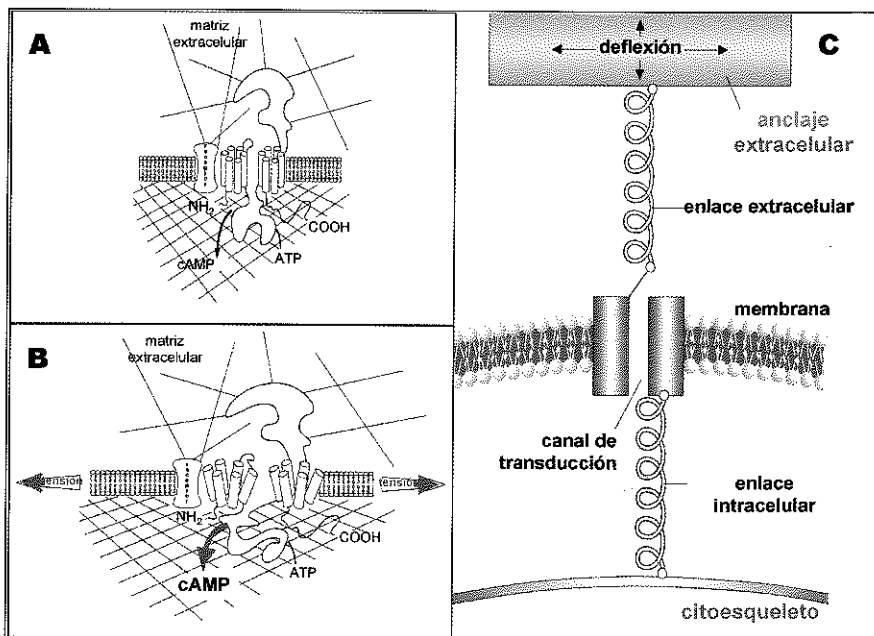


FIGURA 6. Mecanismo inicialmente propuesto para la activación de la adenilato ciclasa (AC) por fuerzas físicas durante la deformación celular. (A) AC en la membrana celular en ausencia de perturbación mecánica. El receptor se refiere a proteínas del tipo de las integrinas del repertorio glicoproteico de la superficie celular y que, previamente, fueron identificadas como receptores de la MEC. Los dominios citoplasmáticos de esas proteínas interactúan con el CE, bien directamente o a través de proteínas de acoplamiento como talina. (B) Se producen distorsiones de la molécula AC durante la deformación celular. Las fuerzas mecánicas que resultan de 1) deformación celular directa; 2) tensión pasiva transmitida por la MEC o 3) generadas por la tracción ejercida sobre el sustrato por las células, son transmitidas por el CE al interior celular (Modificada de: Watson, 1991; fig 1, pg 2016). (C) Esquema de la transducción mecanosensorial. Un canal de transducción está fijado por anclajes intra y extracelulares al CE y a la MEC. El canal de transducción responde a la tensión en el sistema, que incrementa por desplazamientos netos entre las estructuras intra y extracelulares (Modificada de: Gillespie y Walter, 2001; fig. 1, pág. 194).

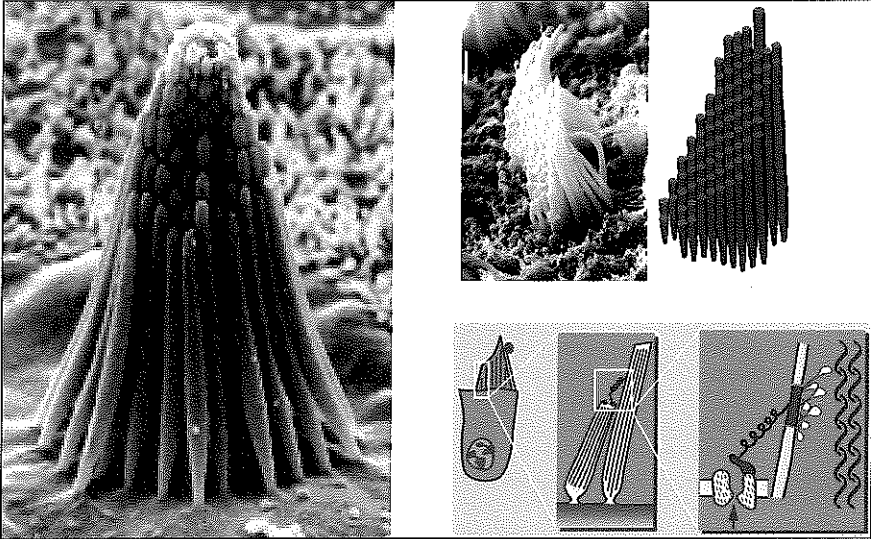


FIGURA 7. Cuando un haz de 50 a 60 cilios, situado en la cúspide de una célula auditiva, vibra en respuesta al sonido la célula ciliada produce una señal eléctrica. El movimiento del haz abre canales iónicos.

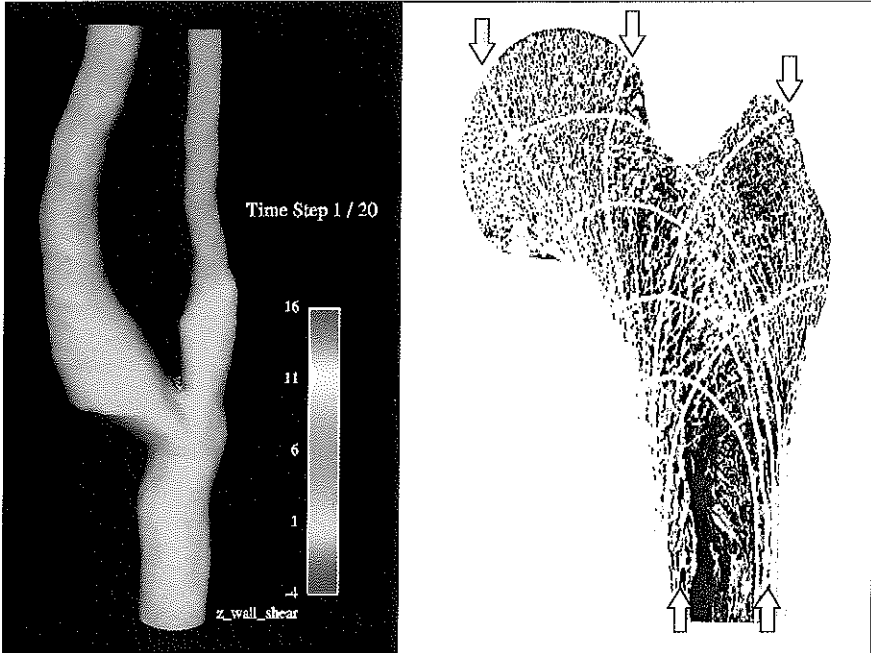


FIGURA 8. La tensegridad dicta la respuesta de la pared arterial a la presión y al flujo de la sangre, y la trama cálcica en el cuello del fémur.

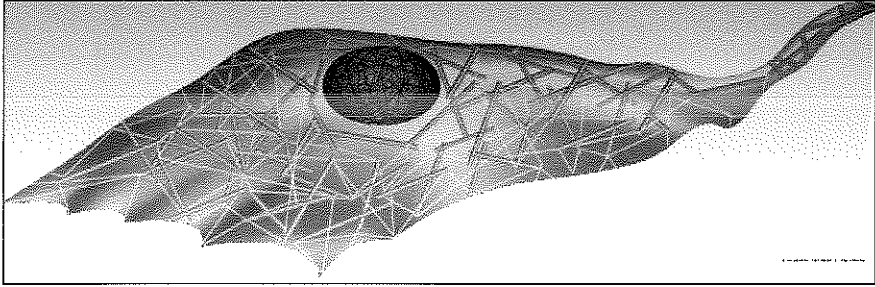


FIGURA 9. Tensegridad y Sistemas biológicos complejos. Los organismos vivos son estructuras jerárquicas que integran sus partes constitutivas más pequeñas —moléculas ADN, proteínas, hidratos de carbono, lípidos— a través de múltiples niveles de organización; desde organelas a células, tejidos, órganos y organismo. Por ello, uno de los retos de la biomedicina es comprender como tantas y tan diferentes moléculas interaccionan, ensamblan y auto-organizan en un cuerpo final, que exhibe propiedades que no pueden ser explicadas exclusivamente en términos de las propiedades de los componentes. El modelo de biotensegridad profundiza en el *hardware* (estructura y propiedades mecánicas) y en el *software* (capacidades de procesar información), así cómo en las interrelaciones entre forma y función celulares.

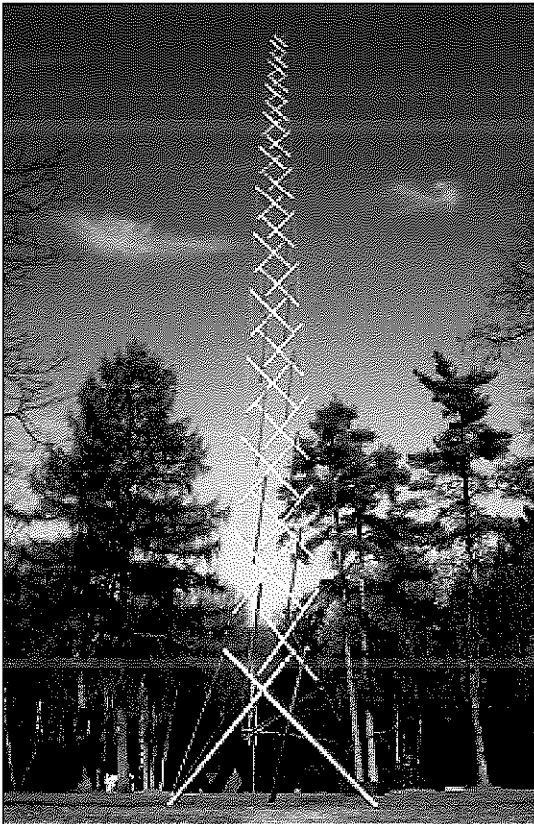


FIGURA 10. *Needle Tower II*. Aluminio y acero inoxidable. 30x6x6 m. Kenneth Snelson, 1969. Museo Kröller Müller, Otterlo, Holanda.

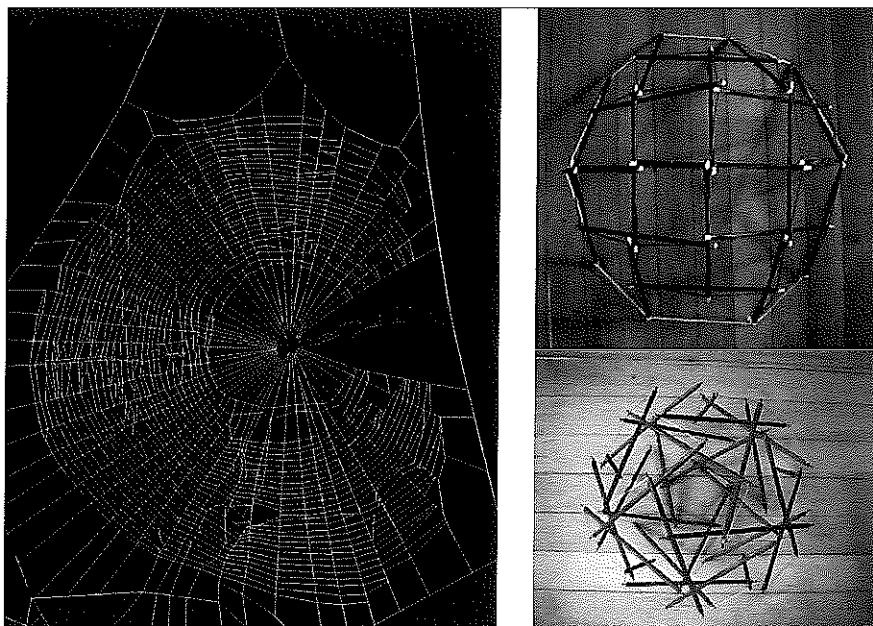


FIGURA 12. Tensegridad natural: tela de araña. Tensegrijuguetes.

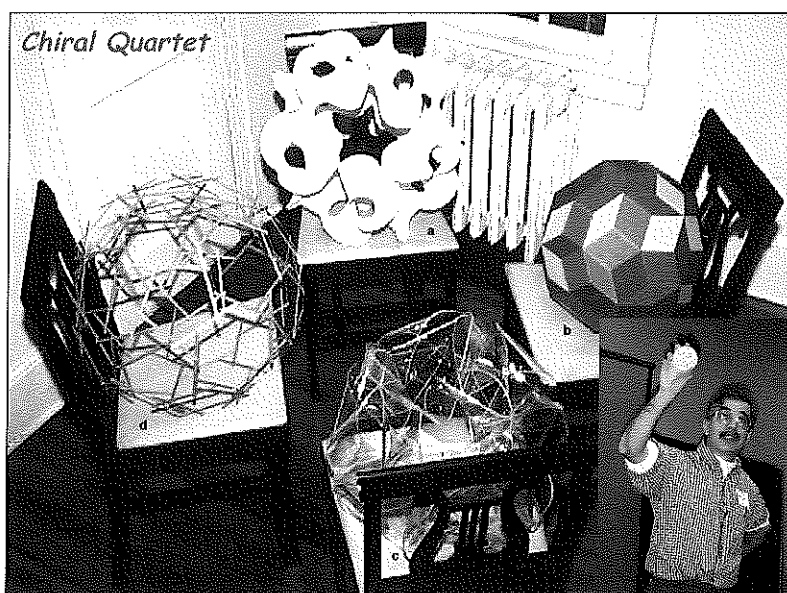


FIGURA 13. George W Hart —«the polyhedron man»— con su icosaedro truncado. *Chiral Quartet*: instalación mostrada en el museo Vanderbilt, en Centerport, NY (nov 1997-enero 1998). Incluye cuatro piezas, todas ellas con simetría icosaédrica quiral. A pesar de su perfil dispar, todas muestran una homología matemática subyacente. *Battered Moonlight* (a), *rhombic enneacontahedron* (b), *I'd like to make one thing perfectly clear* (c) y *tensegrity structure* (d).

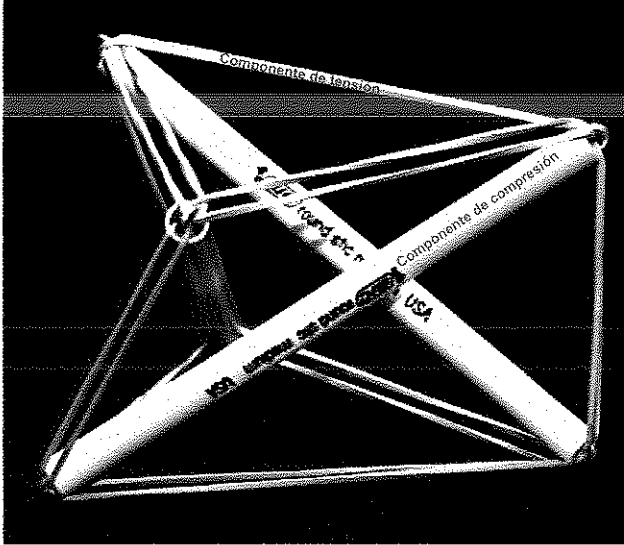


FIGURA 14.
 Un sistema de tensegridad está formado por «islas de compresión en un océano de tensión».
Tensegrity
 [tensegridad] =
tensional integrity
 [integración tensional ó tensión integrada].

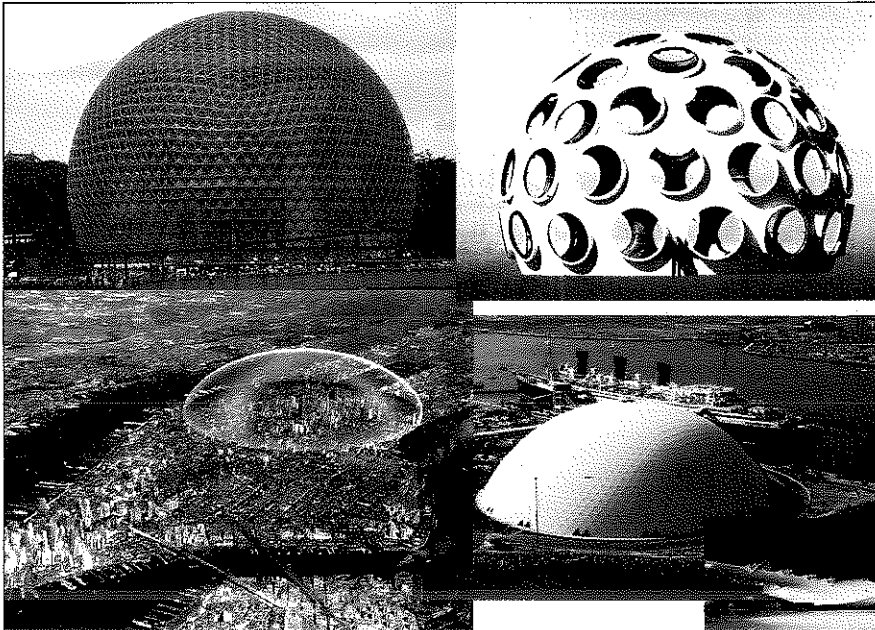


FIGURA 15. Cúpulas geodésicas. Pabellón de los EE.UU. en la Expo'67 de Montreal, Canada (a). *Fly's eye dome* (b). Diseño de la cúpula para control ambiental de Manhattan, NY (1964) (c). Hughes Flying Boat H-4 (HK-1) Hercules —*Spruce Goose*— Exhibit, Long Beach Harbor, California (d).

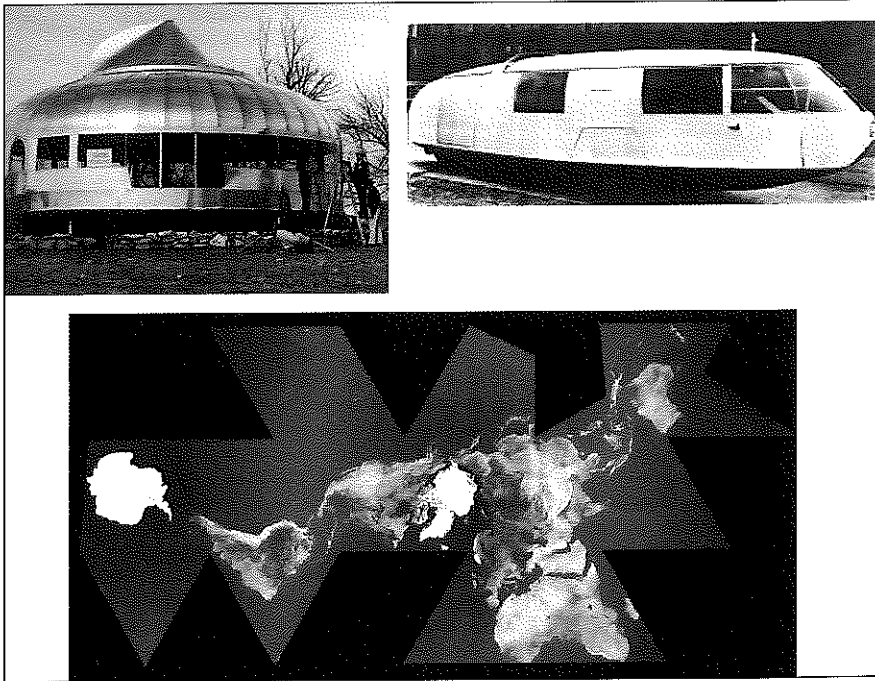


FIGURA 16. El mundo Dymaxion® (*Dynamic Maximun Tension*) de RB Fuller. *Wichita House* (1944-5); *Dymaxion car* (1933-4) y *World Map on Dymaxion Projection* (1946).

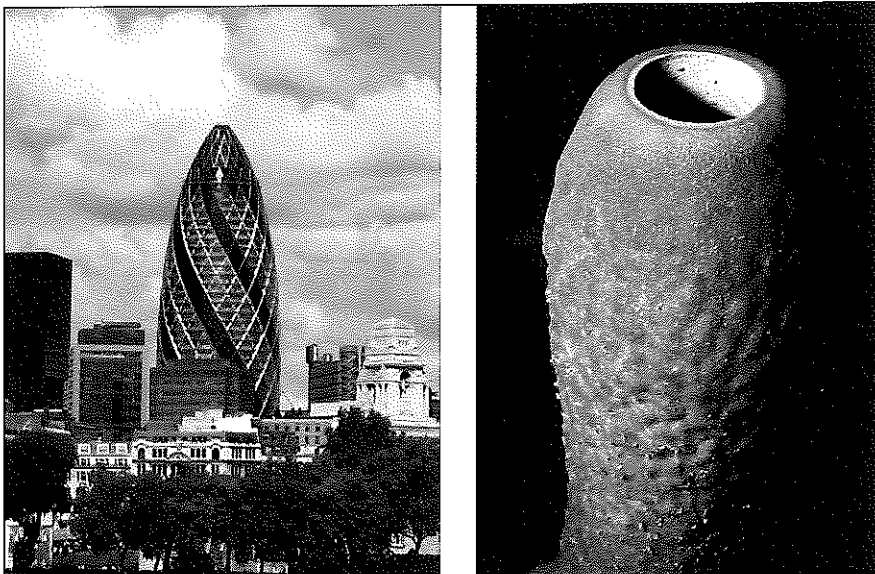


FIGURA 17. Biomimetismo. Norman Foster: *Eric Gherkin*, Londres. Esponja tubular púrpura (*Aplysina lacunosa*). Edificio y esponja utilizan el mismo diseño para afrontar y aprovechar el estrés ambiental.

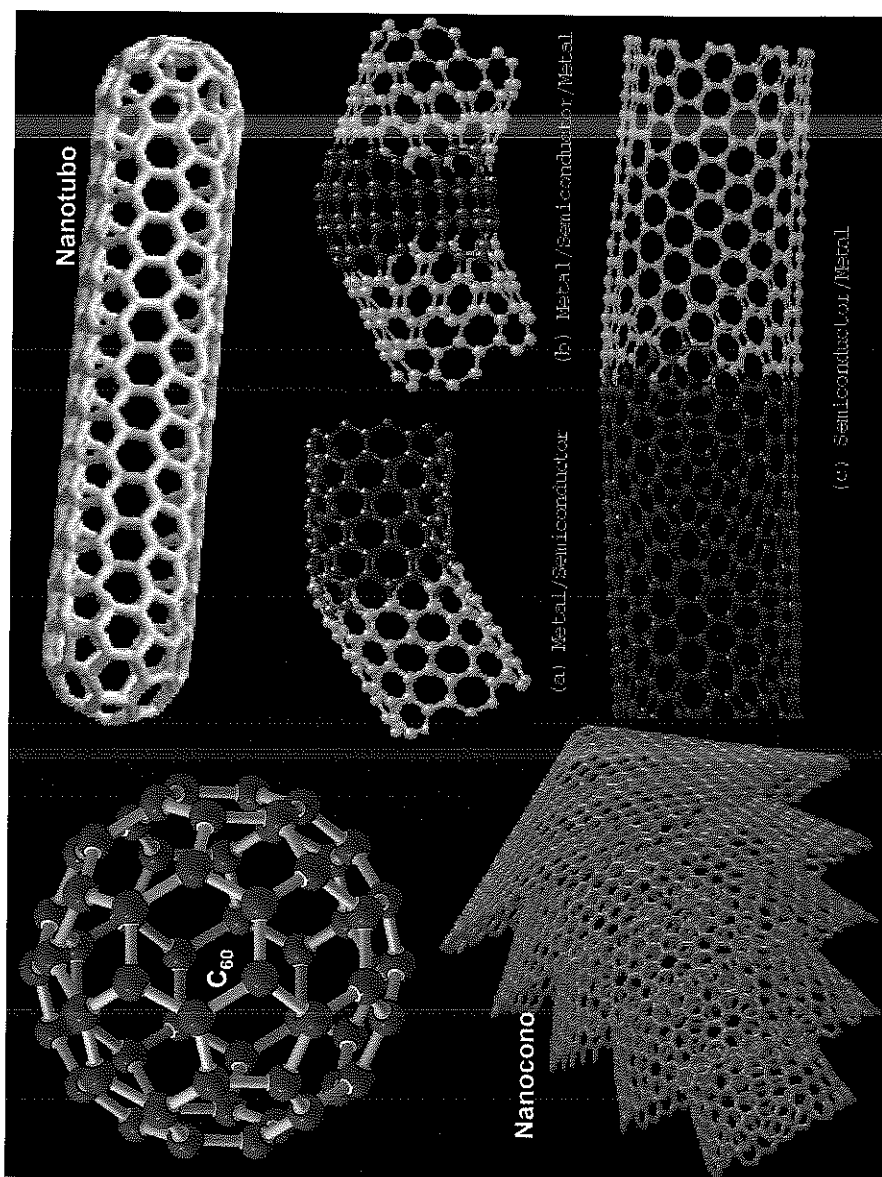


FIGURA 18. Avances en nanociencia y nanotecnología prometen importantes implicaciones para la salud, bienestar y paz en las décadas futuras. El incremento en el conocimiento en este campo conducirá a avances científicos fundamentales. Además, ello supondrá cambios importantes en el modo en que materiales, diseños y sistemas sean comprendidos y creados. Entre las expectativas esperadas se encuentran una mayor eficiencia de las computadoras, restauración de órganos humanos mediante ingeniería de tejidos, materiales de diseño creados mediante el ensamblaje directo de átomos y de moléculas y la emergencia de fenómenos completamente nuevos en química y en física (Del *Executive Summary*, en Roco y Bainbridge, pág. v).

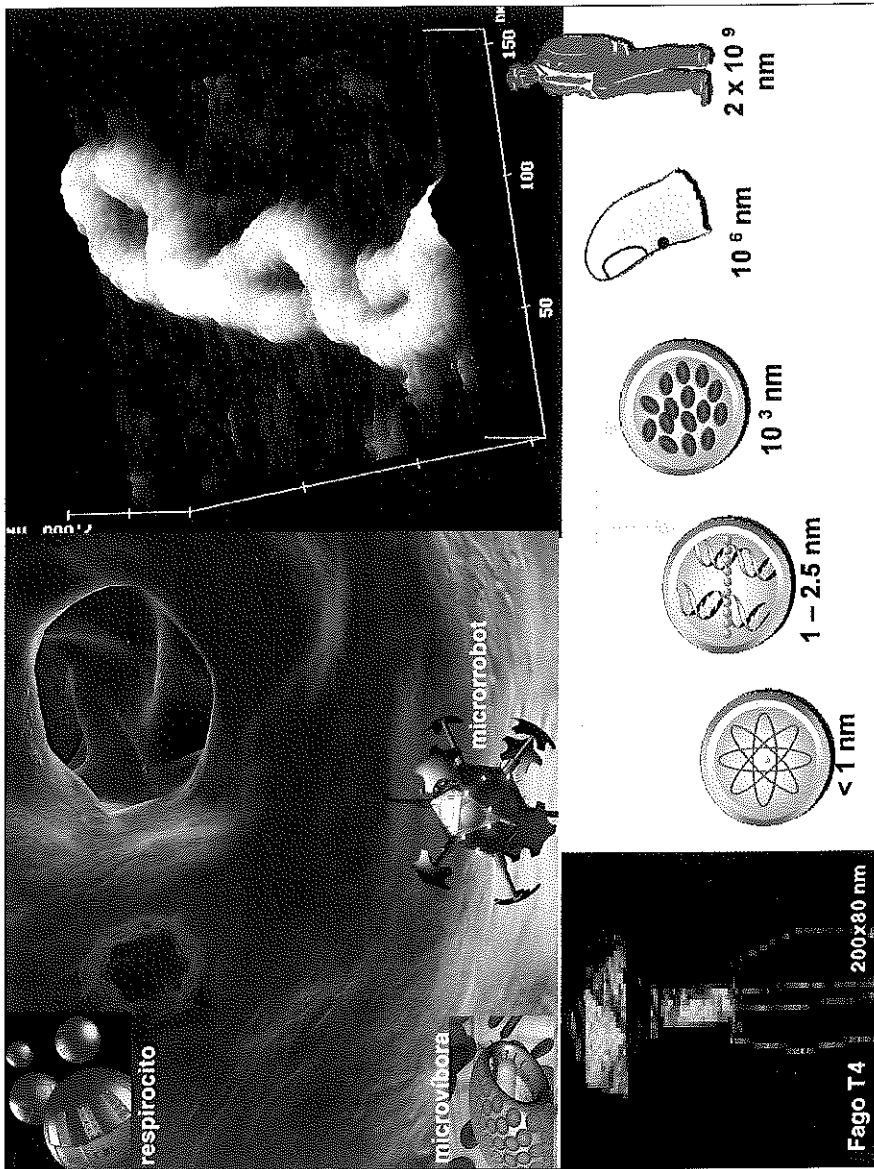


FIGURA 20. Nanotecnología molecular es el control posicional de la estructura molecular para crear materiales y diseños con precisión molecular. El cuerpo humano está compuesto de moléculas; por ello —comenta Robert A Freitas— la nanotecnología molecular permitirá progresos sin precedentes en los sistemas de salud. Más que una ampliación de la medicina molecular, la nanomedicina utilizará máquinas moleculares para resolver problemas médicos... y, finalmente, mejorar y ampliar la estructura y función de la naturaleza humana (Del *Preface & Acknowledgments*. Freitas 1997).

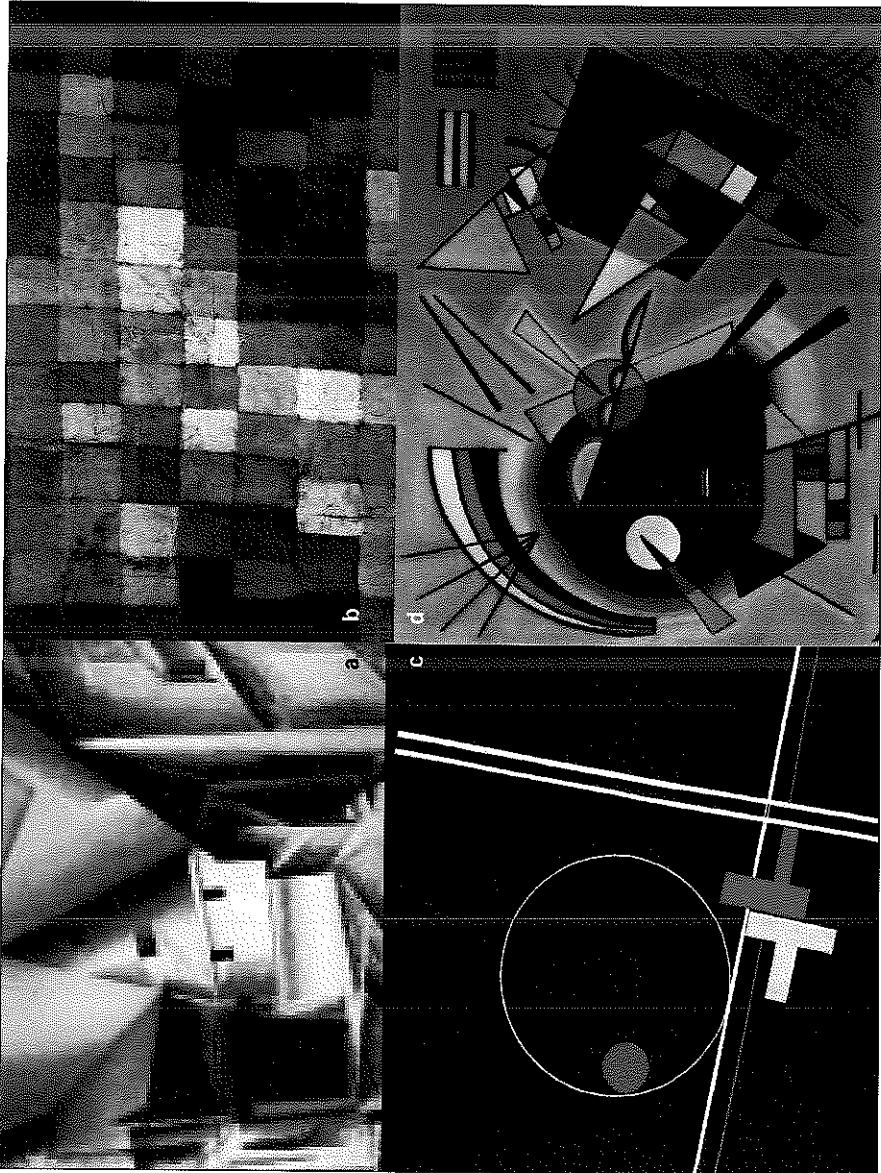


FIGURA 22. Lyonel Feininger (1871-1956): *Oberweimar*, 1921 (a). Paul Klee (1879-1940): *Ancient Sound* (b). László Moholy-Nagy (1895-1946): *Untitled Construction*, 1922 (c). Wassily Kandinsky (1866-1944): *Black and Violet*, 1923 (d).

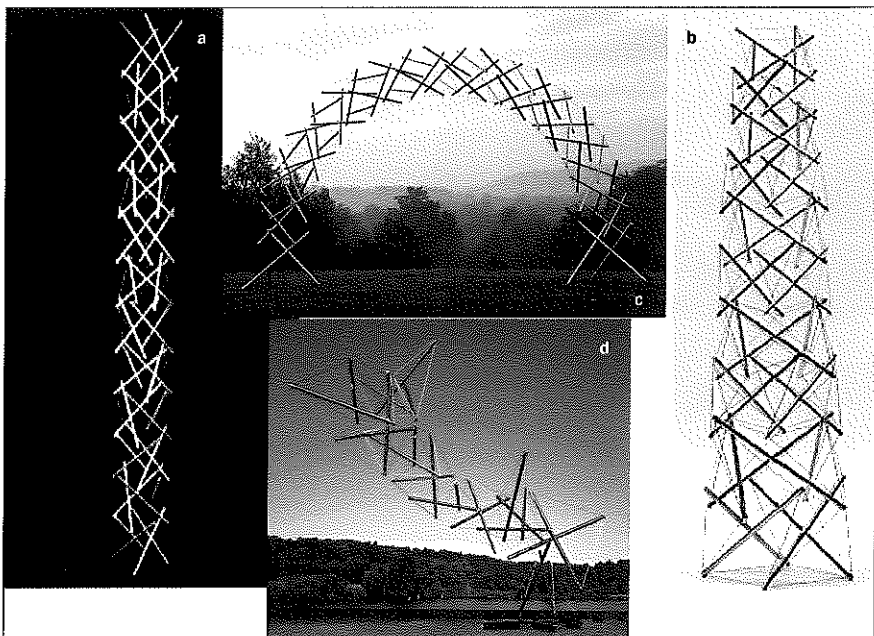


FIGURA 27. Kenneth D Snelson: *4-Way Tower* (aluminio y acero inoxidable, 214 x 28 x 28 cm) 1963 (a); *4-Way Tower* (aluminio y acero inoxidable, 147 x 46 x 46 cm) 1959 (b); *Rainbow Arch* (2.1 x 3.8 x 1 m) 2001 (c); *Dragon* (9.3 x 9.4 x 3.6 m) 2002-3 (d).

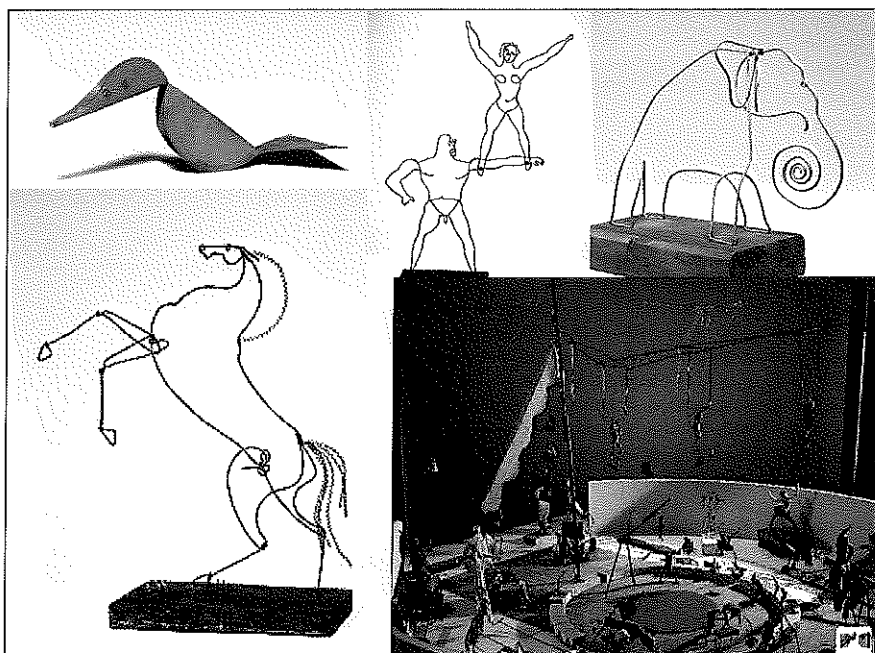


FIGURA 29. Alexander Calder: *Duck*, 1909; *Two acrobats*, 1928; *Elephant*, 1928; *Rearing stallion*, 1928; *Cirque*, 1927

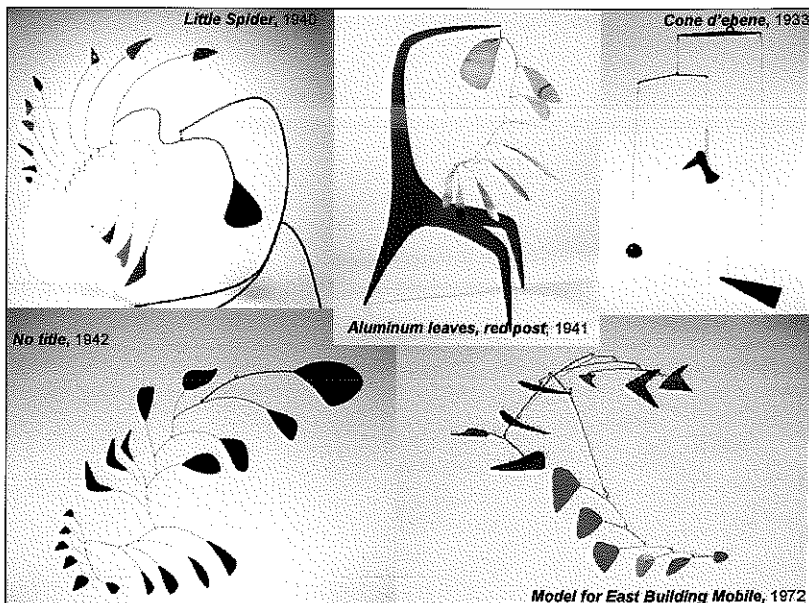


FIGURA 31. «Un *móvil*: una pequeña celebración particular; un objeto definido por su movimiento y que no existe sin él; ... un simple juego de movimientos ... [que] no significan nada más que a ellos mismos... son impredecibles... [son] combinaciones de las que nunca se sabe si son ciego encadenamiento de causas y efectos o el tímido desarrollo de una idea surgida inopinadamente» (Jean-Paul Sartre).

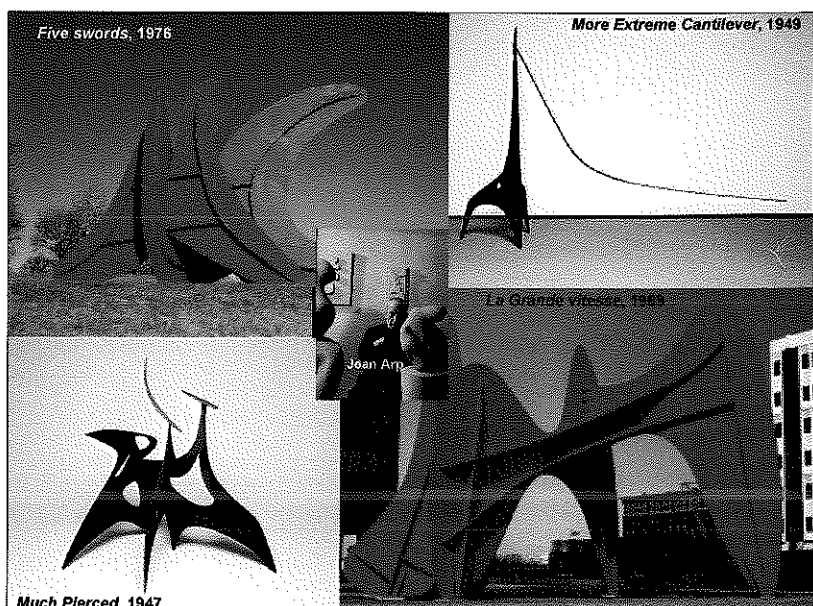


FIGURA 32. Estables (*stables*), etiqueta sugerida por Jean Arp (1886-1966).

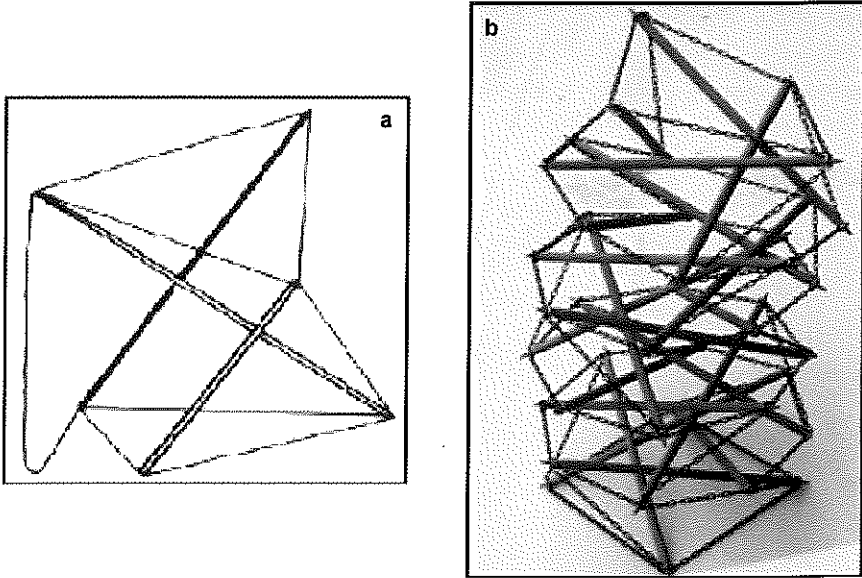
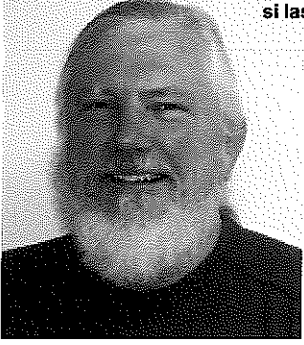


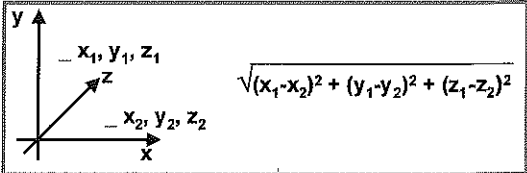
FIGURA 33. Karl Ioganson (1920): Sistema pre-tensegridal (a). David G Emmerich (1925-1996): Z3-1 mat prismatique 4B racémique. («Structures tendues et auto-tendants») (b).

**“Si los cables (elementos de tensión) forman un polígono convexo estricto;
 si las barras (elementos de compresión) son diagonales internas,**

**y si existe estrés positivo para cada cable,
 un estrés negativo para cada barra y
 equilibrio en cada vértice;**

entonces la tensegridad es superestable”





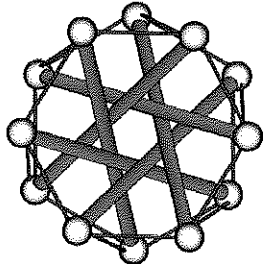
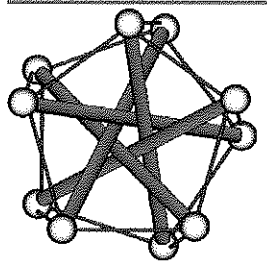
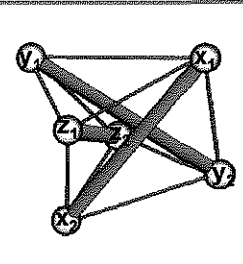




FIGURA 34. Robert Connelly (Ph D , 1969). Tensegridades superestables generadas por grupos diédricos.

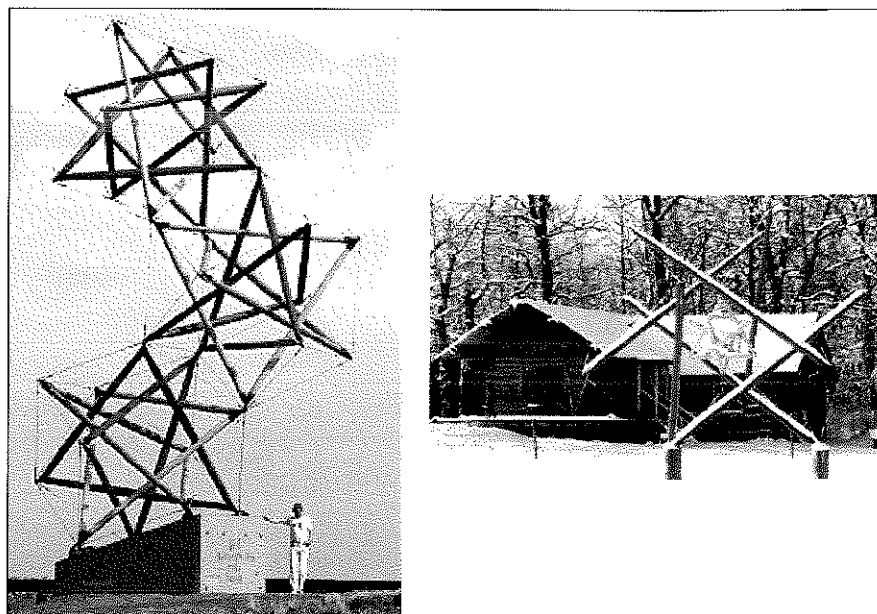


FIGURA 35. Rafael Felipe Moreno «Falo» (Sevilla, 1946): *Crescent moon* (1989, *The VI Henry Moore Abstract Sculpture Competition Hakone Open Air Museum, Japan*). *Cow in calf* (1987). *Logart*: arte a base de troncos y tensegridad. *Tensart*: arte construido sobre los principios e tensegridad.

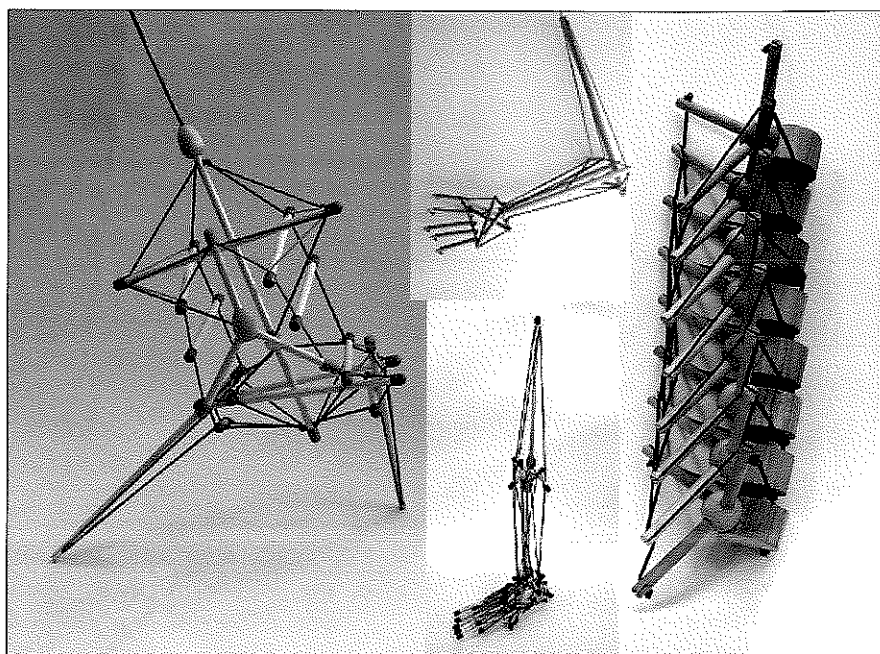


FIGURA 36. Modelos tensegridales de segmentos del esqueleto.

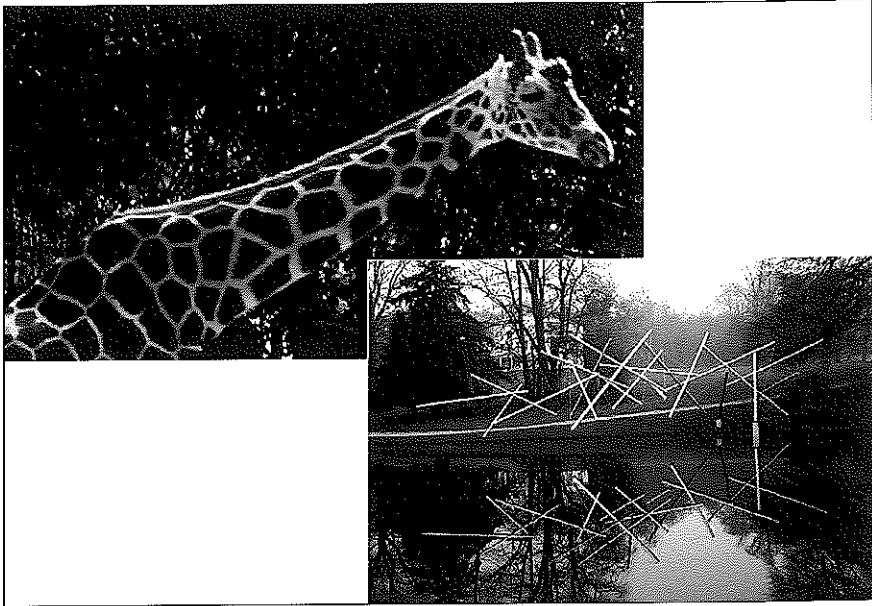


FIGURA 37. Kenneth D Snelson: *Easy-K* (6.5. x 6.5. x 32 m) 1970. El cuello de la jirafa, el acto de levantarse de la cama o una escultura de Snelson, comparten el principio de tensegridad.

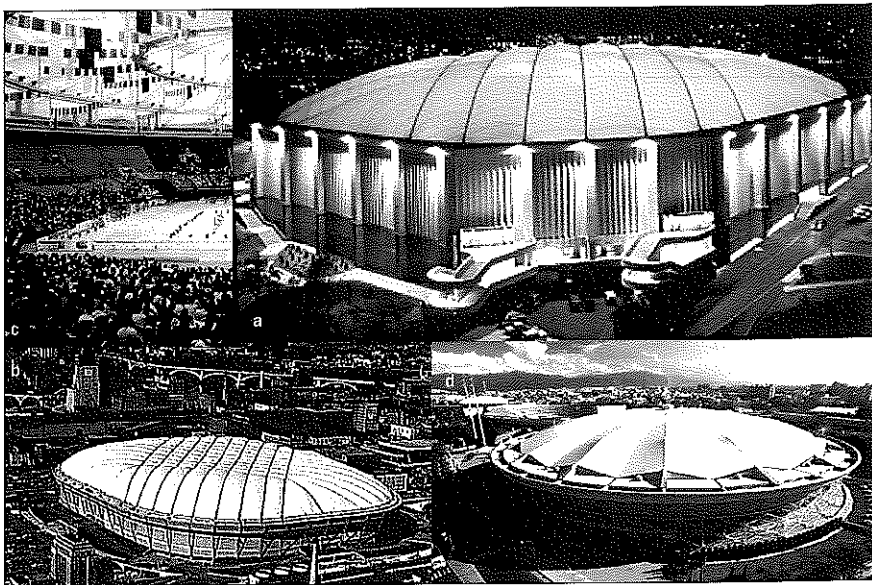


FIGURA 38. Celosías espaciales by GEIGER Engineers®: *Carrier Dome*, Syracuse University, New York (1980); *Hubert H Humphrey Metrodome*, Minneapolis, Minnesota (1980); *Olympic Gymnastic Arena*, Seoul, Korea (1986); *Taoyuan Sports Arena*, Taiwán (1993).

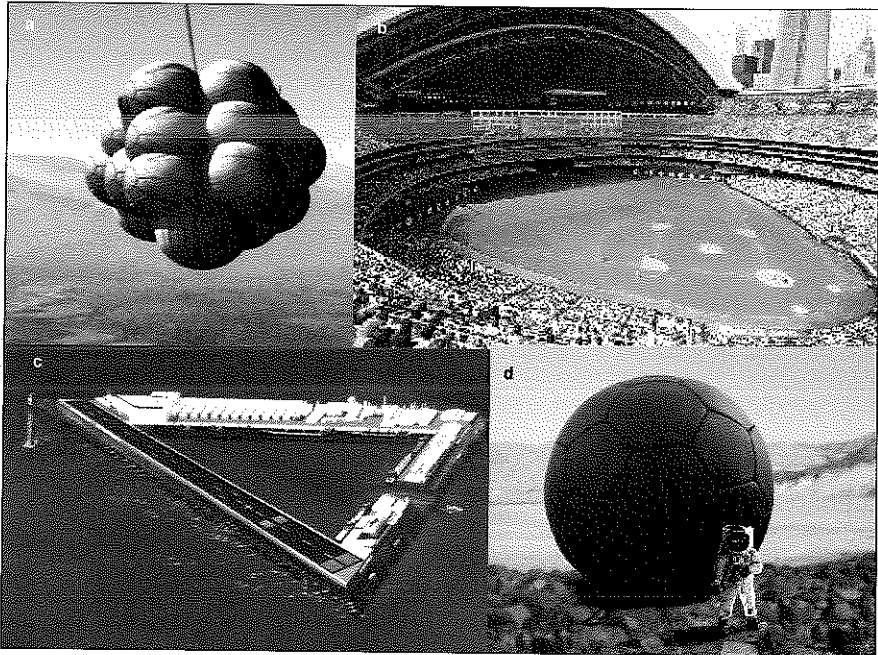


FIGURA 39. Estructuras tetraédricas espaciales (*tetrahedral space frame design*): *Sky dome*, Toronto; *Newfoundland deltaport*®; *Tumbleweed rover* - NASA.

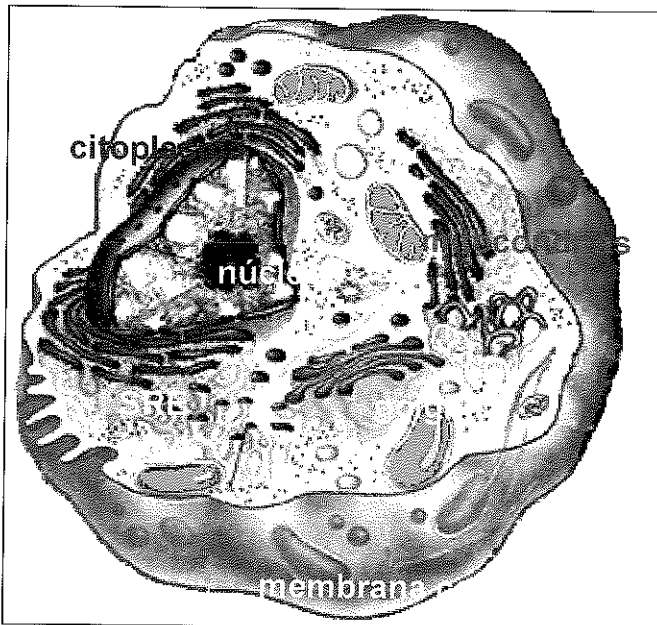


FIGURA 40. Modelo celular estándar.

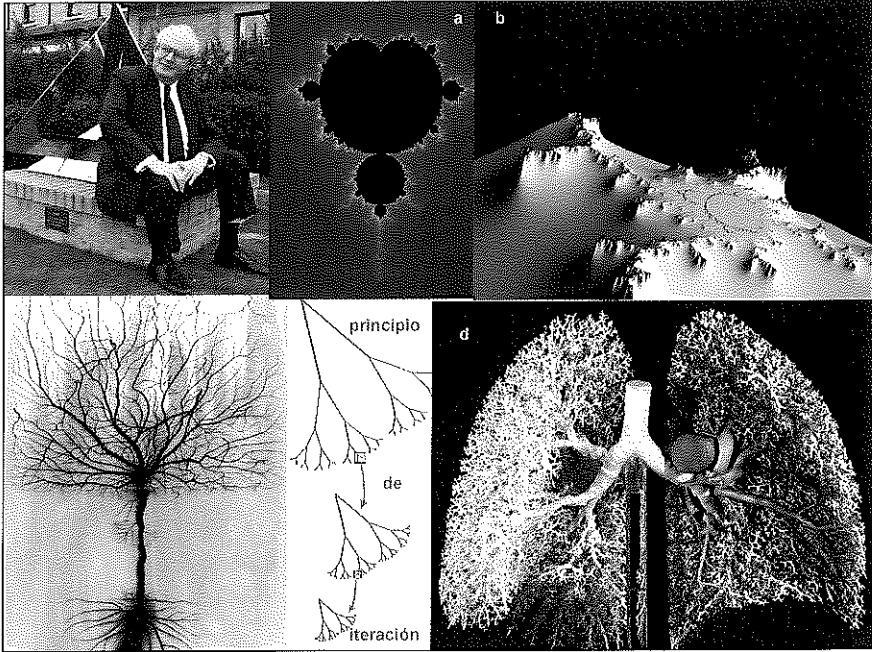


FIGURA 41. Benoit Mandelbrot (n 19024). Geometría fractal: Fractal tipo espacio \mathbb{R}^3 (a); geometría fracta

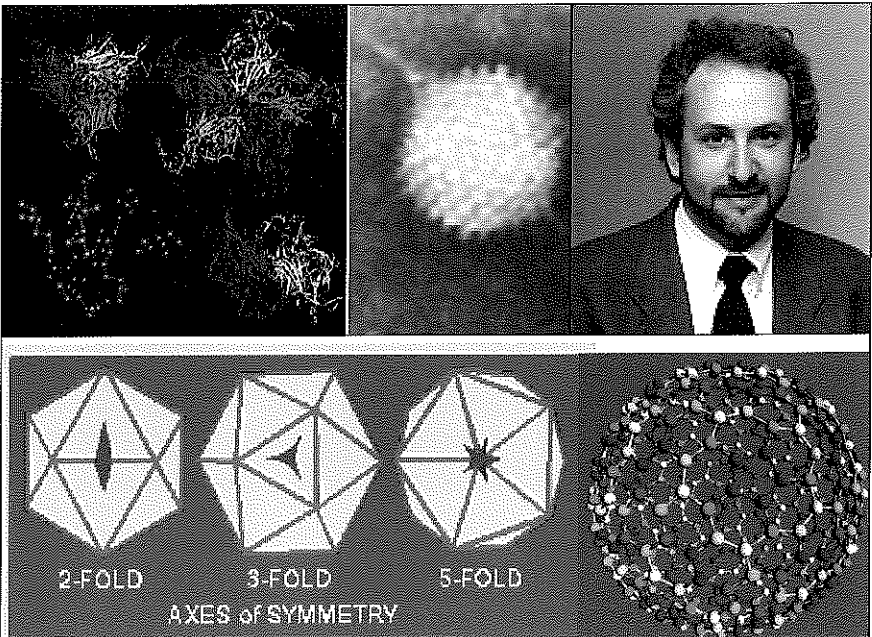


FIGURA 42. Donald E Ingber. Para construir una cápside mediante subunidades repetidas, un virus debe conocer las reglas que dictan cómo deben componerse. Para un icosaedro, las reglas se basan en la simetría rotacional del sólido: simetría 2-3-5.

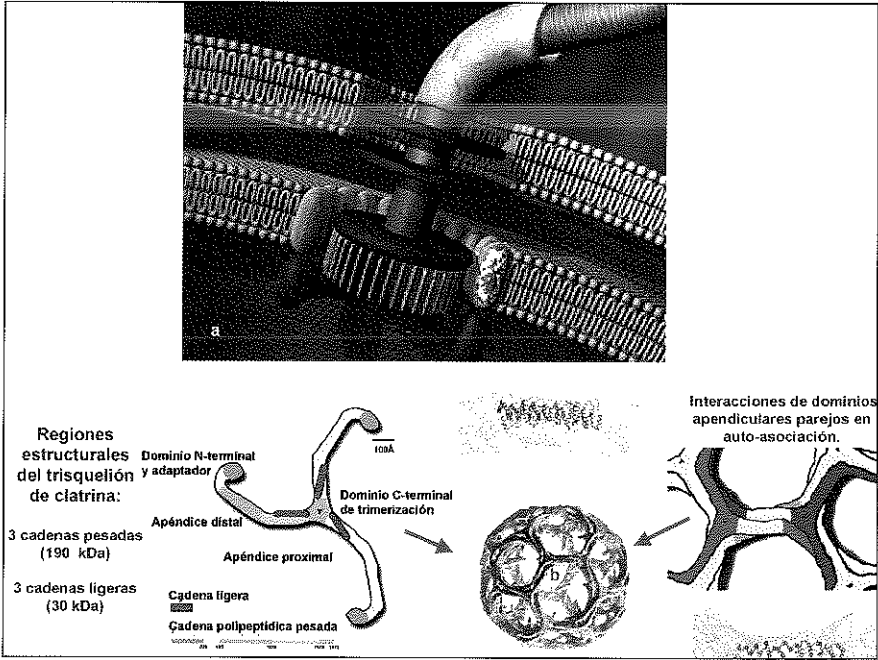


FIGURA 43. Auto-organización: auto-ensamblaje supra-molecular. Microbiomotor: flagelo (a). Biocontenedor (b).

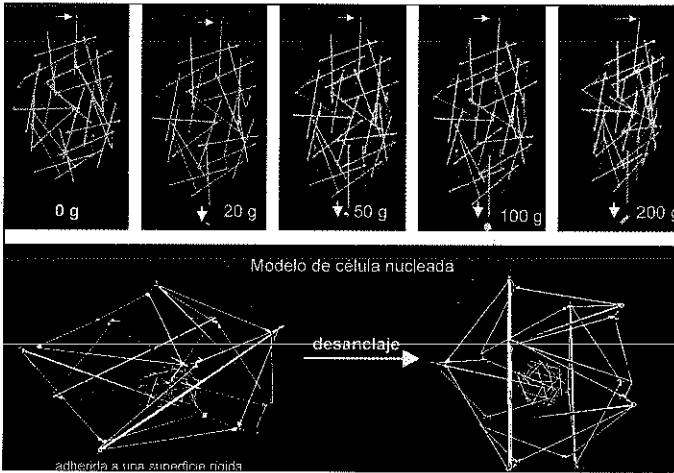


FIGURA 45. Modelos tensegridales celulares. (A) Un modelo fue suspendido de uno de sus polos y sometido a cargas crecientes (izquierda – derecha: 0, 20, 50, 100 ó 200 g) aplicadas en su polo opuesto. El estrés local induce reordenaciones globales de la estructura. (B) Modelo de tensegridad de una célula nucleada cuando se adhiere y repta sobre un sustrato rígido (izq) o se libera y esferifica (der). El modelo celular y su núcleo están contruidos con barras metálicas y cuerdas elásticas. Las barras representan MTs y los elásticos corresponden a MFs e IFs que soportan tensión, en el CE (Modificada de: Ingber, 2003; fig 4(B), pág 6).

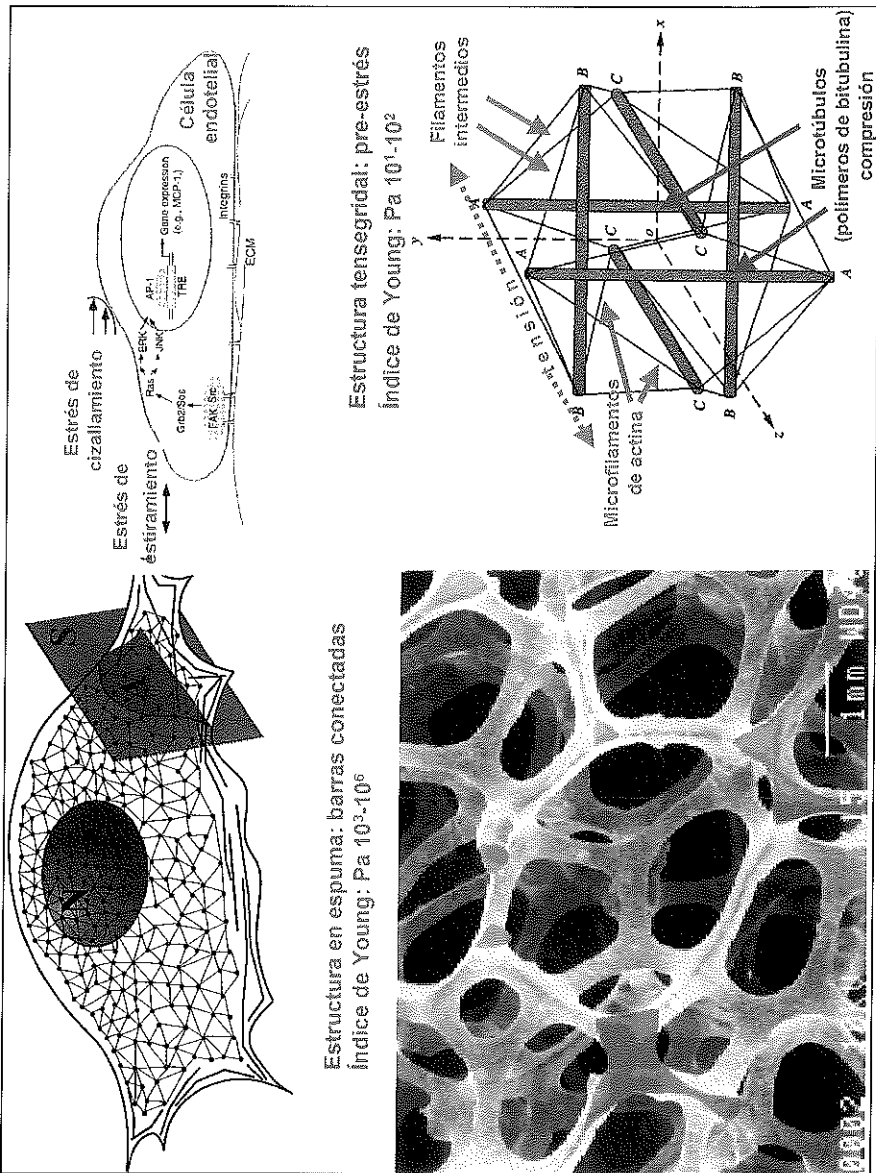


FIGURA 46. Dos modelos estructurales (en espuma o de barras conectadas, y tensegrital o de pre-estrés) explican el comportamiento mecánico que define las relaciones entre la célula y su entorno. La parte superior del dibujo muestra un esquema de la definición espacial de una sección transversal celular. Una superficie (S) que atraviesa la célula intersecta la red de filamentos de actina que transmite las fuerzas tensiles a través del área de sección (A). Se define el pre-estrés como la suma de todas las fuerzas por unidad de área transeccionada en la dirección perpendicular al área. N denota el núcleo celular. (Modificada de: Stamenović y Coughlin, 1999)

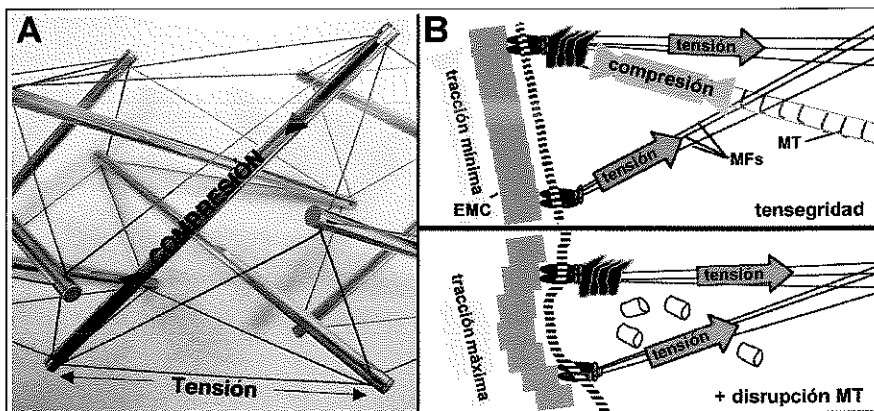


FIGURA 47. Esquemas comparativos de las estructuras tensegridales correspondientes a la cúpula geodésica y al entramado celular. A. Escultura tensegridal por KD Snelson. La estructura está compuesta por una serie de barras de acero aisladas que están interconectadas mediante una serie continua de cables metálicos. Las barras soportan la compresión generada por la red de cables tensados. La estabilidad mecánica de esta estructura, como la del citoesqueleto, depende del grado de tensión preexistente —preestrés— o tono en la red. B. Diagrama de la complementariedad o del balance de la fuerza tensegridal entre microfilamentos tensados (MFs), microtúbulos comprimidos (MTs) y la matriz Extracelular (EMC) en una región de la trama del citoesqueleto (no se muestran los filamentos intermedios tensados). Cuando colapsan los MTs, las fuerzas de compresión soportadas por ellos son transferidas a las adhesiones focales en la EMC; ello hace que incremente la tracción sobre el sustrato.

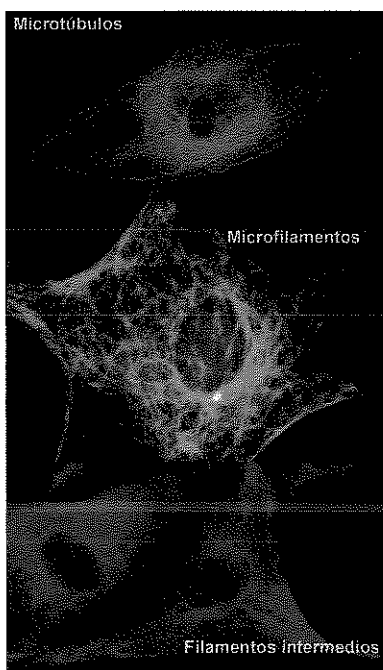


FIGURA 48. (A) Microtúbulos-MTs, (B) microfilamentos-MFs y (C) filamentos intermedios-Fis, que conforman el citoesqueleto, visualizados con tubulina-proteína verde fluorescente, falloidina rodaminada y anticuerpos fluorescentes frente a vimentina, respectivamente. Los MTs se expanden por la totalidad del citoplasma, en ocasiones adoptando formas curvadas. Los MFs construyen fibras lineales preestresadas y geocúpulas de actina. Los Fis estructuran una trama reticulada que se extiende desde el núcleo hasta la periferia. Mientras que los microtúbulos soportan compresión, microfilamentos y filamentos intermedios proveen tensión (Tomada de: Ingber, 2003; fig. 3, pág. 5).

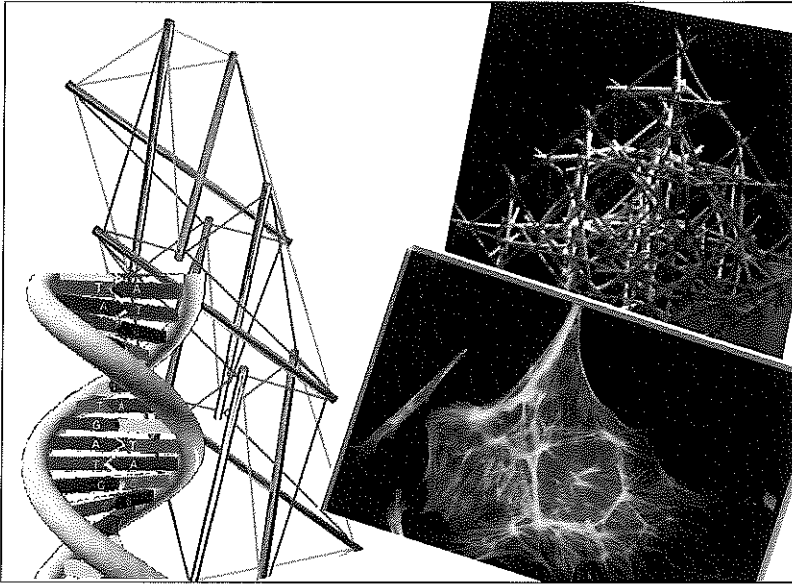


FIGURA 49. La estructura tensegrital permea la totalidad del entramado celular. Hélice tensegrital de K D Snelson y ADN (a); K D Snelson: *On Growth and Form*, 2001 (b); citoesqueleto y esqueleto nuclear (c).

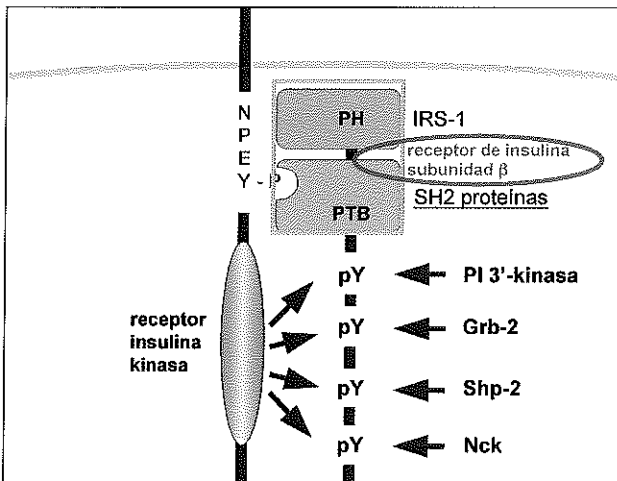


FIGURA 50. Bioquímica de estado sólido. La proteína IRS-1 (sustrato del receptor de insulina-1) contiene un dominio PH (homología pleckstrina) amino-terminal que potencialmente media interacciones con la membrana y un dominio PTB (acoplamiento de fosfotirosina) que acopla un sitio específico yuxtamembranar de autofosforilación Tyr, en el receptor de insulina. El dominio quinasa del receptor de insulina activado fosforila restos Tyr en IRS-1, que actúa como lugar de atraque para dominios SH2 (homología src 2) de proteínas-señales (Modificada de: Pawson y Scout, 1007; fig 4, pág 2077).

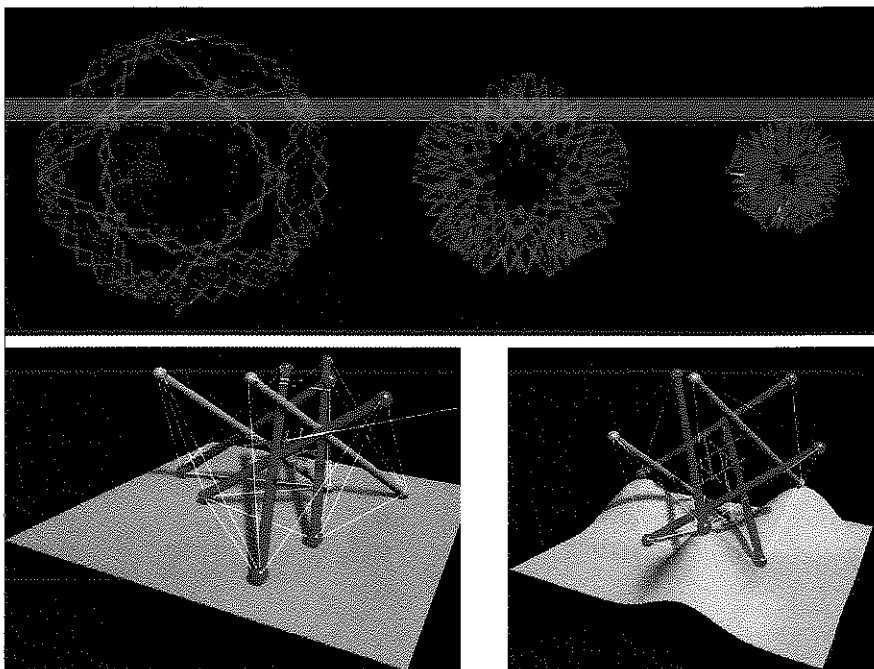


FIGURA 51. La esfera (icosadodecaedro) de Chunk Hoberman ofrece un modelo tensegrital satisfactorio para explicar las topologías nucleares en relación con las de la matriz extracelular.

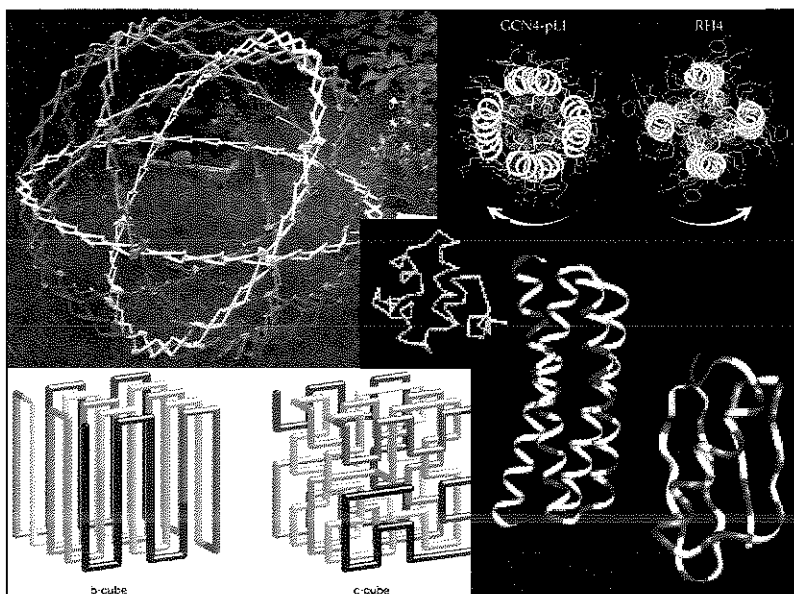


FIGURA 52. La esfera (icosadodecaedro) de Chunk Hoberman ofrece un modelo tensegrital satisfactorio para explicar las topologías de los plegamientos de las cadenas polipeptídicas.

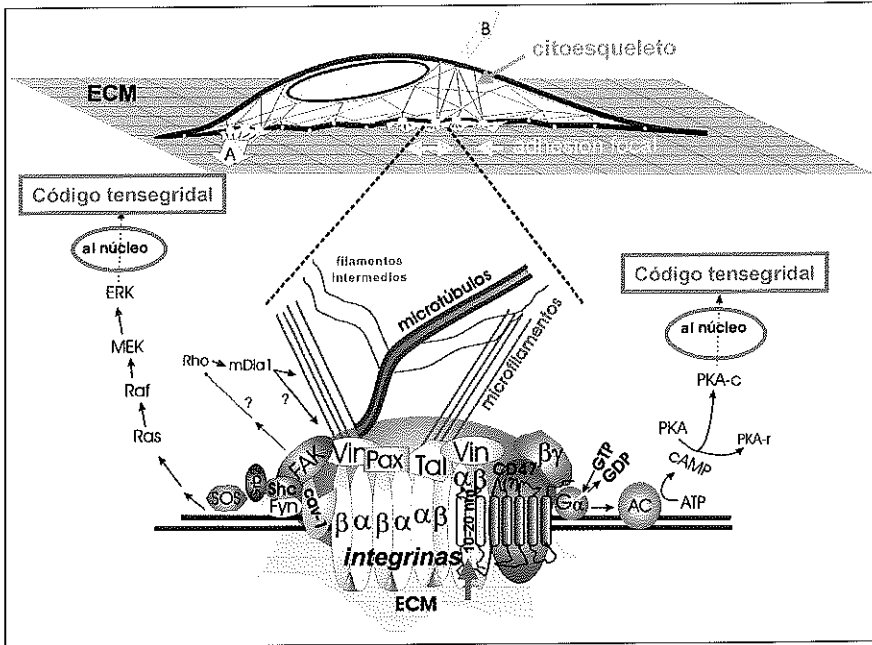


FIGURA 53. Esquema de cómo la aplicación de fuerzas a través de la MEC (A) o directamente sobre la superficie celular (B), se orientan hacia las adhesiones focales (AFs) ancladas por integrinas a la MEC o hacia los componentes del CE, respectivamente. La tensión generada internamente y las fuerzas transmitidas vía contactos intercelulares alcanzan de manera similar las AFs a través del CE. Las fuerzas concentradas en las AFs pueden estimular el agrupamiento de dímeros de receptores de integrinas (α , β) e inducir el reclutamiento de proteínas de adhesión focal [por ej., vinculina (Vin), paxilina (Pax) o talina (Tal)] que interaccionan directamente con los MFs e indirectamente con MTs y IFs. Las fuerzas aplicadas a estos complejos especializados de adhesión al CE disparan cascadas de señales asociadas a integrinas que, entre otras, incluyen a la quinasa de adhesión focal (FAK) que puede estar involucrada en el reclutamiento de Shc y en la modulación de Rho que, a su vez, puede regular la intensidad de la respuesta a través de mDia1. Caveolina (cav-1) puede también presentar Shc a integrinas para activar la cascada ERK (proteína quinasa regulada por señales extracelulares) / MEK (proteína quinasa activada por mitógenos) que tiene por componentes iniciales las oncoproteínas Raf y Ras. Por su parte, CD47 se asocia con el heterodímero de integrinas para formar un complejo proteico que mimetiza la acción de los receptores acoplados a proteínas G. Cuando las integrinas son estresadas mecánicamente, el complejo estimula la activación mediada por Gs de la cascada de cAMP a través de la adenilato ciclasa (AC), que resulta en la translocación nuclear de la subunidad catalítica de la proteína quinasa A (PKA) (Modificada de: Alenghart e Ingber, 2002; fig.1, pág. 3. Ingber, 2003^a; fig. 1, pág. 5).

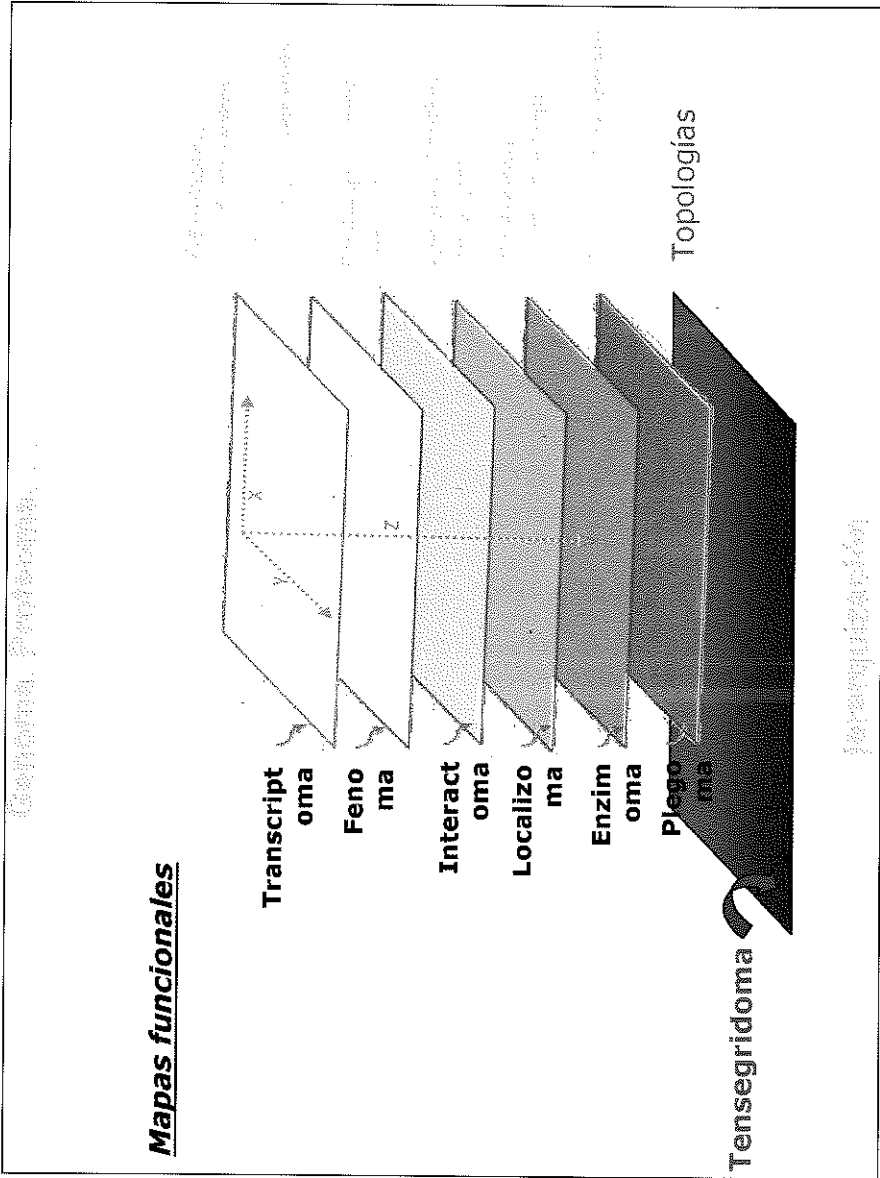


FIGURA 54. Jerarquía estructuro-funcional celular: del genotipo a los fenotipos topológicos.



FIGURA 55. La «*Alegoría de la Geometría*» (Laurent de la Hire, 1649-Toledo Museum of Art, Toledo, Ohio) muestra un papel y un compás, que aluden a las configuraciones típicamente utilizadas para dibujar ortógonos, en especial la *sección áurea*.

REAL ACADEMIA DE DOCTORES DE ESPAÑA

CONTESTACIÓN DE LA DOCTORA

MARÍA CASCALES ANGOSTO

*Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores
Doctoras Académicas; Doctores Académicos.
Señoras y Señores:*

El protocolo académico establece que, cuando se incorpora un nuevo Académico a compartir nuestras tareas, sea un Académico de Número de la Corporación quien desde esta tribuna presente al recipiendario, comente sus méritos profesionales, y el contenido de su discurso y exprese la felicitación de los miembros a quien representa. La Real Academia de Doctores se engalana hoy en este marco inigualable de la Real Academia de Farmacia, para recibir con alegría y satisfacción a PEDRO GARCÍA BARRENO. En esta solemne ocasión la Junta de Gobierno me ha encomendado la noble tarea de presentar hacer un elogio de su categoría intelectual y profesional que le hace acreedor a acceder al rango de Académico. Es la amistad y los sentimientos del corazón lo que me trae a este lugar, y es de todos conocido que los vínculos científicos y personales del nuevo académico con la que les habla, son grandes y esto ha de imponer un punto de afecto y cordialidad en esta *laudatio* que no están reñidos con el rigor de la pura crítica.

Mi amistad con Pedro García Barreno se inicia en el año 1998 con mi integración en la Mesa del Instituto de España. Entonces tuve la suerte de conocer y tratar a nuestro nuevo académico debido a su cargo de Secretario General en dicho Instituto. Después de una serie continuada de fructíferas colaboraciones pude comprobar sus extraordinarias cualidades, tanto a nivel científico como personal.

COMENTARIO A SU CURRICULUM VITAE

El Doctor García Barreno para quien hoy se abren las puertas de esta Real Academia nació en Madrid en 1943. Es Doctor en Medicina, con Premio Extraordinario, por la Universidad Complutense de Madrid, y especialista en Cirugía. Su formación se inició en el Hospital Provincial de Madrid, y continuó en los hospitales de la Universidad de Cardiff en el Reino Unido, y en los de Michigan y de Texas en los Estados Unidos. Obtuvo el "Award" del *Educational Council for Foreign Medical Graduates*, que supone la convalidación de la Licenciatura en Medicina en los Estados Unidos. Estudió Bioquímica y Biología Molecular en la Facultad de Ciencias Químicas y Ecuaciones Diferenciales en la de Matemáticas, de la Universidad Complutense. Cursó estudios de solfeo y de piano.

Actualmente ocupa la Cátedra de Fisiopatología y Propedéutica Quirúrgicas de la Universidad Complutense de Madrid, tras desempeñar la de Cirugía Experimental en la Universidad Autónoma de Barcelona, y la de Fisiopatología Molecular en el Departamento de Bioquímica y Biología Molecular de las Facultades de Química y de Biología, de la Universidad Complutense. Profesor invitado en el Departamento de Análisis Matemático de la Facultad de Matemáticas de la Universidad Complutense. *Lecturer* en Filosofía en el *Imperial College* londinense. Es Consultor Senior de la Unidad de Medicina y Cirugía Experimental del Hospital General Universitario Gregorio Marañón de Madrid, del que fue su Director Médico y Subdirector de investigación. Ha desempeñado los cargos de Director del Plan Nacional de Prevención de Minusvalías, Presidente de la Comisión Nacional para el Síndrome Tóxico y Secretario General del Instituto de España.

Académico de Número de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, en la que es Vocal-Bibliotecario de su Junta de Gobierno. Académico de Honor de la Real Academia de Córdoba de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes; Académico Correspondiente de la Real Academia Gallega de Medicina y Cirugía; *Fellow* de la *Royal Society of Medicine* del Reino Unido; Académico de la *Academia Scientiarum et Artium Europaea*; *Fellow Member* de la *InterAmerican Medical and Health Association*, y Académico correspondiente de la Academia Dominicana de Medicina. Diplomado en

Defensa Nacional por el Alto Estado Mayor de la Defensa; en Informática Médica por el Instituto de Informática del que fuera Ministerio de Educación y Ciencia, y en Dirección y Gestión de I+D por la Escuela de la Función Pública Superior del Instituto Nacional de la Administración Pública. Master en *Business Administration* por el Instituto de Empresa en Madrid. Miembro de las Sociedades Científicas Españolas de Bioquímica y Biología Molecular, de Cirugía y de Medicina; y de las internacionales *Phylosophy of Science Association* (USA), *Society of Social Studies of Science* (USA), *Shock Society* (USA), *Leukocyte Biology* (USA), *European Society for Surgical Research* y *European Biomedical Research Association*. Es Socio de Honor de la Asociación Española de Técnicos Especialistas en Fotografía Científica. Está en posesión del *Certificate of Merit for Distinguished Service to the Community Dictionary of Internacional Biography* y el *Award* de la *Community Leaders of the World* del *The American Biographical Institute*.

Ha sido Director de la revista *Arbor* del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Vicepresidente del Comité Regional de Ética de la Investigación Clínica de la Comunidad de Madrid, y Secretario del Capítulo Español del Colegio Internacional de Cirujanos.

Su productividad científica la avalan las numerosas publicaciones a nivel internacional en revistas del máximo prestigio, que han sido citadas en muchas ocasiones, y los numerosos libros y monografías en las que ha intervenido como autor y editor. Ha impartido Cursos de Tercer Ciclo sobre el tema “Respuesta Celular a la Agresión”, ha sido requerido para pronunciar conferencias en distintas Universidades y Academias Españolas y del Extranjero y ha participado en múltiples congresos nacionales e internacionales. Ha dirigido 21 Tesis Doctorales, que han conseguido todas ellas la máxima calificación. Ha recibido una serie de Premios, entre los que hay que destacar el Premio Condesa de Fenosa de Investigación Biomédica y el “Premio a la Innovación 2004” de la Federación de Empresarios de Madrid otorgado a la Unidad de investigación que dirige. Ha conseguido financiación para sus proyectos de investigación por entidades españolas y extranjeras. Ha participado en programas de divulgación de la ciencia, y ha escrito numerosos artículos en ABC, en EL MUNDO y en otros medios de prensa.

No es mi papel continuar con la descripción de su amplio *currículum vitae*, ni seguir al nuevo Académico en su disertación, porque ni lo dicho por él necesita mayores esclarecimientos, ni yo soy capaz de agregar algo que merezca ser escrito en el orden de las ideas que guían su discurso. Diré algo de lo que se me alcanza referente al tema del discurso del nuevo compañero.

COMENTARIO AL DISCURSO

Entre las vías de señales mecanosensibles de la mayoría de las células, incluidas las células sensoriales especializadas, surge un tema común: que la función de sus moléculas mecanotransductoras depende de interacciones en las que participan la matriz extracelular y el citoesqueleto. En los tejidos vivos, en condiciones normales, el estrés mecánico se distribuye a las células a través del andamiaje de la matriz extracelular que mantiene unidas las células y proporciona soporte mecánico al tejido. Las señales mecánicas que se propagan desde esta matriz convergen sobre receptores de adhesión celular - las integrinas - localizados en la membrana celular. Tales receptores transmembrana se adhieren intracelularmente al citoesqueleto de actina. Todo ello mediante estructuras especializadas de adhesión focal, verdaderos puntos de soldadura entre las células y la matriz extracelular.

Se ha identificado un canal de sodio del que depende la sensación de tacto en el ratón. La estructura y la función de este canal se correlacionan con los canales de sensación táctil del *Caenorhabditis elegans* que están compuestos de degenerinas. Ambos canales, en el ratón y en el nematodo, pertenecen a la misma superfamilia de canales conocida como canales de sodio degenerinas/epiteliales. Las degenerinas se identificaron en un rastreo genético de rutina en nematodos insensibles a sensaciones táctiles (mutantes *mec*). El hecho más importante es que las degenerinas requieren conexiones con el citoesqueleto y con proteínas de la matriz extracelular para ser sensooperativas. Una proteína de la matriz extracelular, la MEC-2, homóloga a la estomatina, es una proteína de membrana que se asocia al citoesqueleto.

Aunque su imbricación en procesos citoesqueléticos predomina en los mecanismos de las células mecanosensibles especializadas, las

respuestas a los estímulos mecánicos están también bien estudiadas entre muchos tipos celulares y en numerosos sistemas orgánicos diferentes. Osteocitos, osteoblastos y osteoclastos mecanosensibles supervisan el remodelamiento óseo en respuesta a sobrecargas compresoras anormales; células musculares lisas modifican su tono como respuesta al incremento de la presión intraluminal en los vasos sanguíneos, bronquios o intestino; el estrés mecánico estimula a los fibroblastos a producir y depositar proteínas en la matriz extracelular, y células endoteliales expresan genes que codifican factores ateroprotectores en respuesta al estrés que provoca el flujo sanguíneo. En todos los casos apuntados las células involucradas no son células comprometidas primariamente en la percepción mecánica; ninguna de ellas es una célula mecanosensible especializada; sin embargo, el papel del citoesqueleto sigue protagonista de la mecanotransducción genérica por células mecanosensibles no especializadas, habiéndose postulado que la deformación de la membrana celular es el principal mediador de la mecanotransducción celular inespecífica .

Junto a la faceta puramente biológica de la tensegridad, a la que he seguido en mis comentarios sobre las bases biológicas de la mecanotransducción, surge un concepto integrador. Tensegridad pretende, en último término, aplicar el lenguaje unificador de la geometría a las diferentes presentaciones de la naturaleza. No cabe duda que es un intento fascinante en la gran unificación; un abordaje complementario a otras grandes teorías: sistemas, complejidad o caos.

Otros comentarios dignos de destacar

Ya he indicado anteriormente que Pedro García Barreno ha sido Secretario General del Instituto de España. Fue designado por la Presidenta Margarita Salas y nombrado por el Ministerio de Educación y Ciencia en Enero de 1996 y ha ostentado dicho cargo hasta Enero de 2004. El ha sido el eje principal sobre el cual ha gravitado la marcha del Instituto.

Permitidme que en este momento dedique unas palabras a MARGARITA SALAS. Como buena científica Margarita es una mujer serena, reflexiva y perseverante, pero además es generosa, entusiasta y se solidariza ante cualquier proyecto. Como Presidenta del Instituto de España, ha sabido ejercer de manera impecable las misiones

de presidir y representar al Instituto en todas las ocasiones necesarias y además la más importante de todas, ha sabido dar juego a los demás. Su mayor acierto, ella misma lo reconoce, fue la de elegir a un Secretario General dinámico con visión de futuro, incansable, y de gran categoría humana: nuestro nuevo académico.

Pedro García Barreno supo entender cual era la misión del Instituto de España abriendo la posibilidad a las Reales Academias, tanto a las integradas en el mismo como a las asociadas, de ampliar su contacto con la Sociedad. Esto lo consiguió ampliando el número de cursos que se impartían con temas de gran interés, así como acometiendo la inmensa labor de informatizar todas las Academias de España. El Proyecto INSDE se inició a requerimiento suyo en el año 1996 y fue una de las iniciativas que más repercusión ha tenido en el Mundo Académico. Ha sido el alma de este Proyecto y es imposible imaginar cómo en tan poco tiempo él ha conseguido completar esta labor en la que no ha regateado toda clase de esfuerzos, desde conseguir financiación hasta su completa realización. El Ministerio de Educación y Ciencia se solidarizó con este Proyecto en la persona de María José Jerez, entonces asesora de la Secretaría de Estado de Universidades e Investigación.

Los ocho años en los que el Instituto de España ha estado dirigido por Margarita Salas y Pedro García Barreno, constituyen una época dorada para esta Institución, que con el transcurrir del tiempo se hará más patente.

En el aspecto personal, el Doctor García Barreno destaca por su iniciativa y entusiasmo. Siempre dispuesto a la colaboración y a la participación en cualquier proyecto. Hemos colaborado juntos en no pocas empresas: cursos y conferencias. En todos se ha conseguido un alto índice de audiencia por encima del aforo en la sala de actos del Instituto. Ello ha traído alguna que otra crítica de esas personas que consideran que las Academias son sólo para los Académicos. Yo he sido participe de su seriedad en el trabajo y de su generosidad.

Siguiendo con el análisis de su personalidad, en Pedro García Barreno hay que resaltar una extraordinaria capacidad de concentración que le hace apasionarse fácilmente con cualquier tema que signifique ciencia y cultura. Es fiel a sí mismo, leal con sus amigos; ha

dibujado con esfuerzo y dedicación su perfil de investigador, docente, gestor y compañero de equipo. Siente interés y curiosidad por todo, y posee un elevado concepto de la verdadera amistad. Posee, además, un temperamento reflexivo y cordial, comprensivo y generoso. Es meticuloso, entrañable y bondadoso y extraordinariamente correcto en su trato. La búsqueda de lo nuevo y la multidisciplinariedad han sido distintivos en el trabajo abnegado, intenso y siempre bien hecho del recipiendario. Si hay algo que le distingue es su gran modestia, no queriendo ser nunca el protagonista aunque los méritos sean suyos. En el momento actual encontrar una persona así es tan difícil, que supone un auténtico lujo tenerle como amigo.

En el terreno familiar, el Doctor García Barreno está casado con Manuela Díez Lorenzo (Nela para los amigos), y tienen tres hijos Alberto, Ricardo y Marta. Ellos junto con su madre Doña Blanca Barreno, su hermana Blanca y sus nietecitos Ivan y Nadia, a quienes ha dedicado el discurso que acabamos de escuchar, forman el todo de su mundo familiar afectivo. En sus años más jóvenes era muy aficionado al deporte y cultivó el montañismo y ahora, a veces, echa de menos ese contacto con la Naturaleza. Es aficionado a la pintura y a la música y disfruta tocando el piano en los ratos libres que le dejan sus múltiples ocupaciones

Con estas palabras de presentación protocolaria he tratado de mostrarles de manera muy resumida, algunas facetas de la personalidad del Doctor PEDRO GARCÍA BARRENO, como profesional de la medicina, como científico, como gestor y como ser humano.

En este momento solemne en el que nuestro nuevo Académico ingresa en Real Academia de Doctores, en la Sección de Medicina con la Medalla 44, todos los miembros de esta Corporación sentimos una profunda alegría. Por ello, querido PEDRO, te doy con verdadera satisfacción la enhorabuena, en mi nombre y en el de todos los Doctores Académicas y Académicos que represento y te recibo con un abrazo lleno de ilusión y esperanza y con la emoción y el afecto de una profunda amistad. El carácter multidisciplinar de nuestra Academia te brinda la posibilidad de armonizar las Ciencias Biomédicas y la Sociedad. Estoy segura que nuestra colaboración será un éxito, y servirá para el avance de la Ciencia y la Cultura en España.

HE DICHO.

ESTA PUBLICACIÓN SE HA LLEVADO A
CABO GRACIAS A LA COLABORACIÓN DE
FUNDACIÓN VODAFONE

