

REAL ACADEMIA DE CÓRDOBA DE CIENCIAS, BELLAS LETRAS Y NOBLES ARTES

Pedro García Barreno

Córdoba, 12 de febrero de 2004

Excmo. Sr. Director Real Academia de Córdoba de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes.
 Ilmas. Sras. Académicas; Ilmos. Srs. 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 Córdoba, 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 mis escasas fuerzas y la falta de títulos valederos para ocupar debidamente este elevado y honorífico sitio; pero la indulgencia 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 y no a propios merecimientos lo debo todo, 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 consagrarme con todas mis fuerzas a vuestros fructíferos trabajos.

Señores Académicos, reciban el testimonio de mi más profunda gratitud y sincero afecto por tan inmerecida elección, que no se hubiera siquiera planteado a no ser por la innata generosidad sin límites de los Ilmos. Sres. Académicos de Número de la Corporación D. Joaquín Criado Costa, D. Ángel Fernández Dueñas y D. Ángel Aroca Lara, quienes suscribieron la propuesta reglamentaria para mi nombramiento. Srs. Criado Costa, Fernández Dueñas, Aroca Lara, gracias.

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 (**FIGURA 1**). El tema de mi disertación – cuya elección no ha sido trivial - discurrirá por los vericuetos de la tensegridad. “Tensegridad: biología, arte, arquitectura” es el título de mi Discurso de ingreso en esta docta Institución.

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 (**FIGURA 2**). Ninguna otra pareja tuvo una influencia mayor en el arte que Matisse y Picasso. 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.

En Ciencia, como en Arte, la colaboración ha sido, es, una enriquecedora realidad (**FIGURA 3**): 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. Una colaboración – la de Watson

y Crick - intensa por la magnitud del resultado – la estructura en doble hélice del ADN - y la brevedad de la interacción (**FIGURA 4**). Simbiosis y sinergia; y también otras facetas: pasión, belleza, creatividad, optimismo, intuición y juego limpio; lo que Subrahmanyam Chandrasekhar refirió como “Verdad y Belleza. Estética y Motivación en Ciencia”.

(**FIGURA 5**) 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 breve tiempo asignado discurriré por un tema cuyo cuño de partida fue la disputa de la propiedad intelectual (**FIGURA 6**). 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, llevó a cabo una idea común en edificios y en esculturas; una interactividad entre arte y ciencia que ha venido a denominarse, en sus diversas propuestas, “futuros emergentes”. Una idea que se plasmó en una nueva palabra: tensegridad. Años después, el biólogo Donald E Ingber aplicó el concepto a la arquitectura de la vida; con ello pretendió, remedando el reto de la Física, la “gran unificación” de la Biología.

Las células (**FIGURA 7**) 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. Alteraciones de esas fuerzas, inducidas por la diferenciación y el desarrollo o por cambios en la actividad o en su comportamiento, resultan en modificaciones en la bioquímica y en la adaptación de la estructura y de la función celulares. Ello condujo al concepto de que las fuerzas percibidas por las células pueden dictar su forma, y que los efectos combinados de los estímulos físicos externos y de las fuerzas internas responsables de mantener el perfil celular pueden inducir modificaciones en la bioquímica celular.

Mecanotransducción es el proceso de articulación y de respuesta a las señales celulares generadas por estímulos mecánicos (**FIGURA 8**). El estrés mecánico regula una amplia colección de funciones fisiológicas: desde la recepción sonora por las células auditivas, hasta la percepción gravitacional, y estímulos mecánicos modulan casi todos los aspectos de la función celular. Además, fuerzas mecánicas influyen de manera directa sobre la forma y la función titulares. Por todo ello, destapar los mecanismos por los que la célula percibe el estrés mecánico es de capital importancia para comprender como las células responden y se adaptan a sus ambientes físicos.

De manera tradicional, 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 (**FIGURA 9**). La mecanotransducción convierte el estímulo mecánico en una secuencia química a partir de la distorsión membranar. 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. 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.

Las respuestas a los estímulos mecánicos están bien estudiadas en 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 MEC, y células endoteliales expresan genes que codifican factores ateroprotectores en respuesta al estrés de cizallamiento que provoca el flujo sanguíneo. En estos casos – osteocitos, 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 (**FIGURA 10**).

El grupo que dirige Donald E Ingber en la *Harvard Medical School* ha 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 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 (**FIGURA 11**).

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 el modelo de tensegridad de la arquitectura celular; un modelo en el que el preestrés 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, denominadas integrinas, entre la MEC, la superficie celular y el citoesqueleto. ¡¡ Esto es tensegridad ¡!

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 12**). Tan etéreas en apariencia como los *mobiles* 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. Fuller se referiría a los nuevos objetos en términos de “mis estructuras”. 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. El término *tensegrity* (tensegridad) se forma a partir de “tensional integrity” (integración tensional o tensión integrada). Las esculturas de Snelson, en que barras o componentes de compresión aparecen como suspendidas en el aire por cables casi-invisibles o alambres extremadamente finos, pueden admirarse por todo el mundo. Valiosos juguetes (*tensegritoys*, **FIGURA 13**) infantiles –y para adultos- utilizan los mismos principios que las tensegridades originales de Snelson. También los futuros tensigrirrobot 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.

En resumen (**FIGURA 14**), se establece un sistema de tensegridad cuando un conjunto de componentes de compresión discontinuos interacciona con otro conjunto de componentes de tensión continuos, para definir un volumen estable en el espacio. 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”.

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 (**FIGURA 15**). La cúpula geodésica es capaz de cubrir más espacio sin soporte interno alguno que cualquier otro confinamiento. La estructura se hace, proporcionalmente, más ligera y resistente cuanto mayor es. La de mayores dimensiones alberga la *Spruce Goose Exhibiton* en Long Beach Harbor, y la más famosa es la que albergó 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**). 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®*. 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, 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.

El siguiente protagonista es Kenneth Snelson (**FIGURA 17**). 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. La mayoría de la gente que se acerca a la tensegridad cree –escribe Snelson- 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 (**FIGURA 18**). 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 –continúa Snelson– un estudiante de segundo año de Arte en la Universidad de Oregón cuando conocí la Bauhaus alemana y a los artistas Klee, Kandinsky, Maholy-Nagy y a otros. 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. La población local veía el lugar como un nido de alborotadores (**FIGURA 19**). El verano en que yo me incorporé – escribe 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 (**FIGURA 20**). Era un hombre pequeño y fornido, de pelo blanco y con unas enormes gafas. Tras un breve silencio interminable comenzó a tartamudear. Describió 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 imaginaria 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 –comenta 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 (**FIGURA 21**). 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. 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 de los *móviles* 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”. 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 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 22**).

Estando en París – remacha Snelso 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 – remacha 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 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 ...”

Una figura que aparece fugazmente en las trayectorias de Richard B Fuller y Kenneth Snelson, es Alexander Calder (**FIGURA 23**). 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; sin embargo, Calder no refiere una sola vez el 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 (**FIGURA 24**). 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. 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” (**FIGURA 25**) –*mobiles*- por Marcel Duchamp, quién 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. 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 escultura sugiere el movimiento, la pintura sugiere la profundidad o la luz. Calder nada sugiere: imita auténticos movimientos animados y les da forma (**FIGURA 26**). 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". Calder también desarrolló "estables" (**FIGURA 27**) –*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. 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.

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. Sin embargo, el descubrimiento de su alumno Snelson abrió nuevas cuestiones matemáticas que siguen ocupando a los matemáticos: qué es una tensegridad, por qué 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 (**FIGURA 28**) demostró una conjetura de Grünbaum sobre la construcción metódica de tensegridades planas estables. 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 intuidas. Las tensegridades tienen una pureza y simplicidad que conducen de manera natural a la descripción matemática.

Los dos únicos requisitos a la hora de abordar soluciones para construir sistemas de tensegridad son, en primer lugar, que los elementos de tensión son rectilíneos por naturaleza (**FIGURA 29**). 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 (**FIGURA 30**). 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. El segundo requisito es la discontinuidad de los elementos de compresión).

Comenta Miguel de Guzmán que, 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. Y esto ocurre de una forma extraordinariamente directa y simple. La economía de esta transmisión de información es absolutamente sencilla, no interviniendo 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.

De acuerdo con la definición más general de Fuller, tensegridad incluye dos amplias clases de estructuras: preestresadas y geodésicas (**FIGURA 31**). Las primeras mantienen la posición o estabilidad de sus vértices sobre la base de un preestrés (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 preestresada: los huesos representan barras que resisten la tracción muscular y la tensión de tendones y de ligamentos; con ello, el tono (preestrés) muscular modula la estabilidad (rigidez) de la figura corporal. 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. Ejemplos de tensegridad geodésica incluyen las cúpulas geodésicas de Fuller, los fullerenos y los armazones tensegridales (**FIGURA 32**). Estos últimos incluyen las denominadas estructuras espaciales 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. Sin embargo, se ha demostrado la existencia de una base estructural común para ambas tensegridades.

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 (**FIGURA 33**). 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. Esta visión simplista –apunta Ingber- no hace justicia a la compleja realidad celular. 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. 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. 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 tensegriudad, en contraste con modelos puramente descriptivos –por ej. fractales (**FIGURA 34**)–, 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.

“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 biotensegriudad. 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 (**FIGURA 35**). 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. 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. Tales patrones aparecen en estructuras, 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 (**FIGURA 36**). 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.

La teoría celular de tensegriudad fue, inicialmente, un modelo intuitivo, utilizándose estructuras tensegriadales prestresadas, construidas de palillos y de gomas elásticas para visualizar el concepto. Sin embargo, tan simples construcciones remedaban fielmente el comportamiento celular. Por ejemplo (**FIGURA 37**), la célula y su núcleo, en un modelo esférico de tensegriudad, 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. La formulación matemática del modelo de tensegriudad 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 preestrés (el nivel de tensión isométrica) en el citoesqueleto son las llaves para que la célula sea capaz de estabilizar su forma. El análisis conjunto de los estos resultados obtenidos señala que la formulación actual de la teoría celular de tensegriudad, a partir de

modelos todavía simples, predice con eficacia numerosos comportamientos mecánicos estáticos y, más sorprendente, insinúa ciertos comportamientos dinámicos.

Frente a la simplicidad del modelo estándar, la célula es una entidad mucho más compleja: es una estructura de tensegridad multimodular (**FIGURA 38**). Ello es que está compuesta de múltiples módulos tensegridales más pequeños, autoestables, que se relacionan a través de reglas similares de integridad tensional, confiriendo al sistema global un acoplamiento armónico mecánico entre las partes y el todo. La destrucción de una unidad o módulo en una tensegridad multimodular solo provoca una respuesta local; el módulo afectado colapsará sin comprometer el resto de la estructura. Otro aspecto importante es que el modelo de tensegridad celular también incorpora la estructura jerárquica de las células y la de los tejidos, órganos y organismo, donde residen. Fuller fue el primero en darse cuenta de que podían construirse sistemas de tensegridad como estructuras jerarquizadas en las que los componentes de tensión y de compresión que conforman la estructura a un nivel determinado fueran, en sí mismas, sistemas de tensegridad – prestrenados y geodésicos – en una escala más pequeña.

Huesos, músculos y tendones utilizan tensegridad para autoestabilizarse. El corazón y los pulmones son estructuras prestresadas sobre la base de fuerzas de distensión (fuerza hemodinámica y presión de aire). Las arquitecturas neurales cerebral y de la retina están también gobernadas por fuerzas tisulares internas, en este caso generadas en el citoesqueleto de sus células constitutivas. Las fuerzas en esos tejidos y órganos están soportadas por una rígida MEC y por fuerzas de contracción opuestas generadas por células vecinas. Por ello se separan los bordes de una herida. Pero la jerarquía tensegridal no acaba en el nivel celular. El citoesqueleto interno, que se comporta como una estructura de tensegridad, 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 (**FIGURA 39**). 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. 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. En resumen, el modelo de tensegridad 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 tensegridad. El reconocimiento de que la naturaleza utiliza estructuras prestresadas y geodésicas a escalas celular y subcelular sugiere que las estructuras de tensegridad son manifestaciones de un principio de diseño común.

¿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 (**FIGURA 40**). 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, y en la etiología de varias enfermedades degenerativas como hipertensión, osteoporosis, asma o insuficiencia cardiaca. Todo ello lleva a considerar cómo las vías moleculares de transducción de señales funcionan en el contexto físico de las células y los tejidos. 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. 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 citoesquelético. Esta bioquímica de estado sólido (**FIGURA 41**) 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. 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.

En los metazoos (no existen homólogos en procariotes, plantas u hongos), las integrinas son los protagonistas del entramado tensegridal (**FIGURA 42**). Además de mediar la adhesión celular, las integrinas realizan conexiones transmembranares con el citoesqueleto y activan numerosas vías de señales intracelulares. Las integrinas y sus ligandos juegan papeles claves en el desarrollo, respuesta inmune, tráfico leucocitario, hemostasia y cáncer, estando en el meollo de diversas enfermedades inflamatorias. Por su parte, son dianas farmacológicas frente a trombosis e inflamación, y son receptores para muchos virus y bacterias. Es importante destacar que la activación de las integrinas puede inducirse a partir de señales extra o intracelulares; 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.

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 supramoleculares 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 represente el *hardware* de los sistemas vivos. ¿Y el *software*?, pregunta Donald Ingber (**FIGURA 43**). Ello conduce al problema de cómo la red estructural afecta a la red de procesamiento de la información, en una célula donde la tensegridad parece ejercer sus efectos sobre la integración de la señal. Los experimentos muestran que aunque una célula puede recibir simultáneamente múltiples señales, la célula las integra instantáneamente para producir sólo una, de una serie de posibles respuestas o fenotipos. Los biólogos celulares tienden a considerar la transducción de señales en términos de autopistas lineales con un destino particular; sin embargo la información transportada por la maquinaria de transducción de señales se distribuye, con frecuencia, por diversas vías, y el mismo estímulo puede originar respuestas diferentes.

Los principios expuestos, ¿son universales?, ¿son aplicables al mundo de los ilimitadamente grande y al de lo muy, muy pequeño? No lo sabemos. (FIGURA 44) 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 (FIGURA 45). 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.

Debo concluir, y concluyo como empecé, agradeciendo afectuosamente a la Real Academia de Córdoba su generosidad por acogerme entre sus doctos miembros.

He dicho.

PAZ y BIEN.