

## La construcción ligera. Invenciones en la arquitectura primogénita

Nelson Rodríguez

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, Facultad de Arquitectura y Urbanismo,  
Universidad Central de Venezuela

### Resumen

Las invenciones tecnológicas de los refugios nómadas de las culturas primigenias son un excelente ejemplo de arquitecturas ligeras, flexibles y adaptables en las que podemos encontrar soluciones constructivas importantes cuyo estudio es de gran relevancia porque todas las características arquitectónicas de las construcciones ligeras contemporáneas se encuentran presentes en estas construcciones primigenias. El trabajo no pretende una visión histórica de esos cobijos, más bien intenta una lectura distinta de las viviendas llamadas "vernáculos" tratando de encontrar el principio tecnológico en el que se basa su construcción.

### Abstract

*The technological inventions of the original cultures nomad refuges are an excellent example of light architecture, flexible and adaptable in which can be found important constructive solutions that are of a great importance study because all the architectonic characteristics of the contemporary light constructions are present in these original constructions. The paper does not pretend to show an historical view of those shelters, but a different interpretation of the housing called "vernacular" trying to find the technological principle in which is based its construction.*

El desarrollo de estilos de vida nómada y móvil trasciende fronteras, culturas e idiomas. El deseo o necesidad de vivir con flexibilidad y movilidad ha llevado a desarrollar soluciones constructivas que prefieran la utilización de materiales ligeros con capacidad para deformarse, transformarse y plegarse, y que satisfagan las exigencias de movilidad y cambio de función asociados a acciones como plegar, enrollar, estirar, apilar, almacenar, rotar o deslizar. Así aparecen una serie de invenciones, entendida ésta como un acto mediante el cual se reconoce una nueva posibilidad técnica trabajada en su forma más rudimentaria (Parker, 1974). Es decir, la invención como una idea, esbozo o hallazgo.

Vivir en movimiento se presenta como un fenómeno en todas las culturas independientemente de su grado de desarrollo tecnológico, económico o social, incluso en la actualidad. Es ampliamente conocido que la mayoría de los pueblos y tribus nómadas se movilizan por la caza, el pastoreo y cosecha o por razones climáticas. Este modo de vida ha consolidado en el tiempo la necesidad de disponer de habitáculos que puedan transportarse de un sitio a otro, y con ello han aparecido una serie de invenciones que caracterizan el movimiento integrado a la identidad de los pueblos nómadas, por ejemplo, para los Kirguiz (de Kirguizistán ex-república soviética de Asia Central) quienes poseen una gran tradición nómada. La palabra nómada es *kochmon*, que significa literalmente "persona en movimiento"<sup>1</sup>.

### Descriptores

Arquitecturas ligeras,  
flexibles y adaptables;  
Construcciones textiles.

### Descriptors

*Light architectures,  
flexible and adaptables;  
textile constructions.*

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN | Vol. 23-III | 2007 |  
pp. 09-20 | Recibido el 11/05/06 | Aceptado el 24/04/08

En este artículo se describen invenciones encontradas en la arquitectura primitiva que han permitido a estas culturas desarrollar cobijos móviles y flexibles como los tejidos de las alfombras como elemento de división entre espacios o como articulación entre el terreno y el espacio interior. Las mallas, en las cubiertas de fibra natural o artificial, divisiones con láminas de papel que pueden deslizarse casi sin roce. Estas culturas utilizan materiales con capacidad para ser traccionados, comprimidos o flectados, con un orden de ligereza en el aprovechamiento de las formas geométricas y los intercambios energéticos, así como materiales con altas resistencias a compresión-tracción y alto módulo de elasticidad, como la madera, el bambú o las fibras naturales.

Mencionaremos los cobijos de las tribus nómadas identificadas por la invención, tratando de encontrar coincidencias y diferencias entre sus características constructivas. Para este estudio hemos seleccionado la Churuata Yekuana del Amazonas venezolano, el Sadamo y el Tuareg de África, la Jaima árabe y la Yurta Mongol. Para la descripción y estudio de estos cobijos se hicieron levantamientos en sitio como en el caso de la Churuata, la Jaima y la Yurta, complementados con la revisión de bibliografía especializada.

### Lo primitivo significa primero

Los refugios de las tribus nómadas, dada su versatilidad, expresan con extraordinaria precisión la condición de movimiento y flexibilidad. Existen muchos ejemplos de arquitectura nómada, como las tiendas y chozas de los indígenas del continente americano, jaimas de las tribus nómadas árabes y africanas, y la yurta de los pueblos nómadas de Asia Central.

Estos refugios o cobijos los podemos definir desde el punto de vista constructivo como un habitáculo cuya cubierta puede montarse o desmontarse con una estructura de soporte que a su vez también es desmontable, pudiéndose transportar todo el conjunto. Son características que convierten estas arquitecturas en construcciones ligeras. Las construcciones primigenias acumulan un conocimiento detallado y preciso de sus materiales y cualidades arquitectónicas en términos de respuesta climática y de sus detalles constructivos, producto del conocimiento transmitido de generación en generación durante siglos y que

permiten generar soluciones claras y directas a los problemas tanto formales como constructivos y climáticos.

Al estudiar los cobijos de estas tribus y etnias observamos que éstas han desarrollado toda su cultura constructiva alrededor de la "tensión": toda su mecánica estructural dominante se basa en sistemas traccionados que recurren a las membranas realizadas con tejidos de fibras naturales. La tensión es quizás la primera invención de estas culturas, aunque ninguna de ellas haya sido capaz de formularla en términos teóricos, pero su aplicación práctica se ha caracterizado por la extraordinaria audacia en sus construcciones.

La tensión de tracción es una fuerza que tiende a separar las partículas de un elemento o componente. Mientras más pequeña es la sección mayor es su resistencia a la tracción. Esto lo podemos expresar matemáticamente como:

$$\sigma_t = \frac{F}{S}$$

Donde:  
 $\sigma_t$ : Tensión de tracción  
 F: fuerza  
 S: Superficie (área)

Bajo esta lógica constructiva el ahorro de peso es considerable y como las formas de las estructuras responden exactamente a la distribución de los esfuerzos sobre la superficie, por consiguiente, las formas son expresión del camino "natural" de las fuerzas. Es decir que, debido a su dependencia del estado de cargas, están sometidas a la estricta disciplina de la transmisión natural de los esfuerzos por lo tanto no se les puede otorgar una forma arbitraria. En esta lógica constructiva se ahorra material y son muy eficientes dado que en construcción mientras menos peso se mueva más eficiente es el proceso.

### El tejido

El tejido es una de las primeras invenciones encontradas en los cobijos. Es una membrana conformada por hilos dispuestos en trama y urdimbre formando una hilada de trama ortogonal. Los hilos de urdimbre son ubicados paralelamente y los hilos de trama son perpendiculares a la urdimbre y cruzados con lo que se conforma el tejido. La palabra latina "membrana" significa pergamino o piel y cuya característica principal es su poco espesor.

La disponibilidad de materiales es un factor determinante para la realización de la cubierta de los cobijos de las culturas nómadas. En los lugares donde abunda material

vegetal, como en la selva tropical amazónica de Sudamérica o en el trópico africano, los tejidos se hacen a partir de fibra vegetal y en los lugares donde escasea la vegetación, como los desiertos de los países árabes o en Asia Central los tejidos se desarrollaron a partir de fibra animal.

En el Amazonas, territorio que comparten Brasil, Colombia, Bolivia, Perú y Venezuela, se encuentran numerosos habitantes nómadas cuyos períodos migratorios varían de acuerdo a la etnia, siendo la velocidad migratoria lo que marca la complejidad o sencillez de la vivienda. Este nomadismo no desarrolla sistemas constructivos móviles, a diferencia de los nomadismos del desierto donde los materiales son escasos. En el Amazonas lo que se transporta y se hace portátil es “la idea de la casa”, su técnica constructiva, forma arquitectónica, orientación, implantación sobre el terreno y su organización interna. A ningún indígena del Amazonas se le ocurriría transpor-

tar por la densa selva amazónica materiales de un lado a otro, cuando con seguridad en el siguiente sitio encontrará en abundancia los materiales necesarios para la construcción. A medida que la velocidad migratoria es más lenta, la vivienda se vuelve más compleja, tanto en organización social como en técnica constructiva.

Una de las viviendas más complejas en técnica constructiva son las “churuatas” (gráfico 1) de las etnias Piaroa, Yekuana, Panare, Pemón, que son un tipo de vivienda colectiva de gran belleza formal formada por una gran cubierta tejida. Su ubicación se encuentra asociada al transporte fluvial y a la localización de tierras fértiles para la siembra organizados en “conucos”. Como son viviendas más consolidadas llegan a formar conjuntos de varias churuatas; el nomadismo se da entre los diferentes miembros de las comunidades.

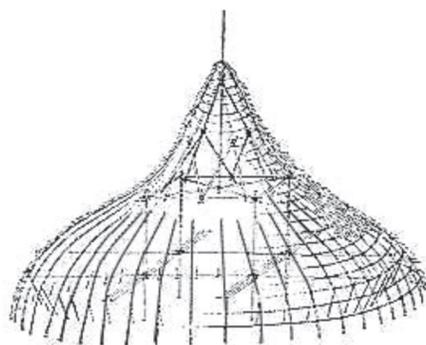
Gráfico 1  
La churuata: vivienda indígena de la selva amazónica venezolana



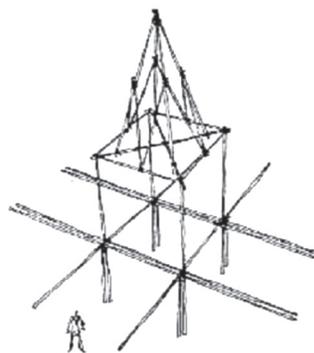
Vista general de la churuata Piaroa



Vista de la estructura



Isometría estructural



Esqueleto central



Conformación urbana

Fuente: Gasparini, 1992.

La churuata varía de acuerdo a cada etnia pero todas son de planta circular, manteniendo siempre su carácter colectivo. Aspecto importante es su cubierta por la geometría anticlástica, superficie alabeada de doble curvatura en sentidos opuestos, en este caso, en forma de “S” (cóncavo y convexo). La planta es circular de 17 mts. de diámetro por 12 mts. de altura, totalmente libre de tabiquería, demarcando el espacio de cada familia con las hamacas y los fogones. En el centro del círculo se construye una armadura en forma de cruz realizada en palos de madera. Este esqueleto portante define el punto alto de la cubierta. Estructura que además sirve para colgar objetos y las hamacas que demarcan el espacio.

La construcción de la cubierta comienza en el perímetro, en cuyo círculo se “siembran” horcones flectados en forma de meridianos radiales que van a unirse en el punto alto central del esqueleto. Estos horcones se amarran entre sí –con un tejido vegetal denominado “bejuco”– en forma de paralelos que aseguran la disposición estructural de la cubierta impidiendo el libre movimiento de los elementos.

A la altura del hombre se colocan unos contrafuertes conformados por palos de madera que, junto a la forma anticlástica de la cubierta, estabilizan la estructura contra los esfuerzos horizontales del viento que puede alcanzar unos máximos entre 20 m/s a 30 m/s. Sobre este entramado de malla radial se coloca un cerramiento de tejido muy delgado de hoja de palma o paja cuya puntada de tejido se realiza de tal forma que no pueda entrar el agua pero sí el aire, logrando así un espacio internamente confortable.

La única abertura del cobijo hacia el exterior es el acceso, que suele ser de reducidas dimensiones “*para que espíritu malo no entre, porque espíritu malo no se agacha...*” (conversaciones con un Piaroa. Entrevista personal, Amazonas, 1997).

La forma anticlástica de la gran cubierta, antes mencionada, y los objetos tejidos como cestas, hamacas e instrumentos de uso cotidiano para la caza o la preparación de alimentos de las culturas amazónicas, son unos de los legados culturales de estos pueblos (gráfico 2).

Al otro extremo, en Etiopía (al sureste de África) encontramos cobijos con características similares en formas arquitectónicas y técnicas de construcción aunque con ciertas variaciones conocidos como “Sidamo”, también llamados “Colmenas de abejas” por su similitud formal con las moradas de las abejas (gráfico 3).

Estos cobijos son monofamiliares, con una organización espacial funcional donde la cantidad de ganado que se tenga determina la ubicación e importancia social de la familia. Son de planta circular entre 7 a 8 metros de diámetro y como el material básico de construcción es el bambú supone la localización de estos cobijos en áreas donde crece esta planta.

El Sidamo dispone de un mástil central de apoyo a toda la cubierta; en el perímetro del círculo se siembran varas de bambú para realizar un tejido en dos sentidos de trama y urdimbre, donde la urdimbre es la vara colocada en forma de meridianos radiales y la trama de lajas de bambú se teje de manera ascendente en forma de aros paralelos que van teniendo diámetros más pequeños en la medida en que van subiendo, como en una cesta de mimbre.

El mismo tejido se utiliza como andamio para los tejedores en la medida en que la altura va subiendo, una altura total del cobijo que suele alcanzar entre 6 y 8 metros. Posteriormente se coloca el cerramiento con hojas de bambú que le sirven de impermeabilización conformando una cubierta tipo *sandwich* de varias capas con funciones diferentes. La única abertura es el acceso pero como la piel está tejida deja unos orificios de tamaño suficiente para que el humo del fogón salga.

Gráfico 2  
Cestería y hamaca indígena



Cesta de forma anticlástica tipo “S”



Cesta de forma sinclástica



Hamaca tejida

Fuente: Gasparini, 1992.

Cabe destacar que estos cobijos (tanto la Churuata como el Sidamo), a pesar de estar ubicados en continentes distintos y pertenecer a diferentes culturas, mantienen características similares desde el punto de vista arquitectónico, entre las cuales podemos mencionar:

1. Techos alabeados que permiten escurrimiento de las aguas de lluvia.
2. Cubiertas perimetralmente apoyadas, con lo que, además de proteger la morada de animales y de los factores ambientales como la lluvia y el sol, se logra repartir toda la carga que llega al suelo, además del peso propio, las sobrecargas producto de las ventiscas o ráfagas de vientos.
3. El tejido constituye una piel que ventila el espacio interior.
4. Las formas geométricas globales anticlásticas contribuyen a la estabilización de la estructura.
5. La organización de las actividades internas responde a requerimientos funcionales, tales como el fogón, que a su vez actúa como ignífugo del tejido vegetal que lo protege de insectos depredadores.

### El pantógrafo

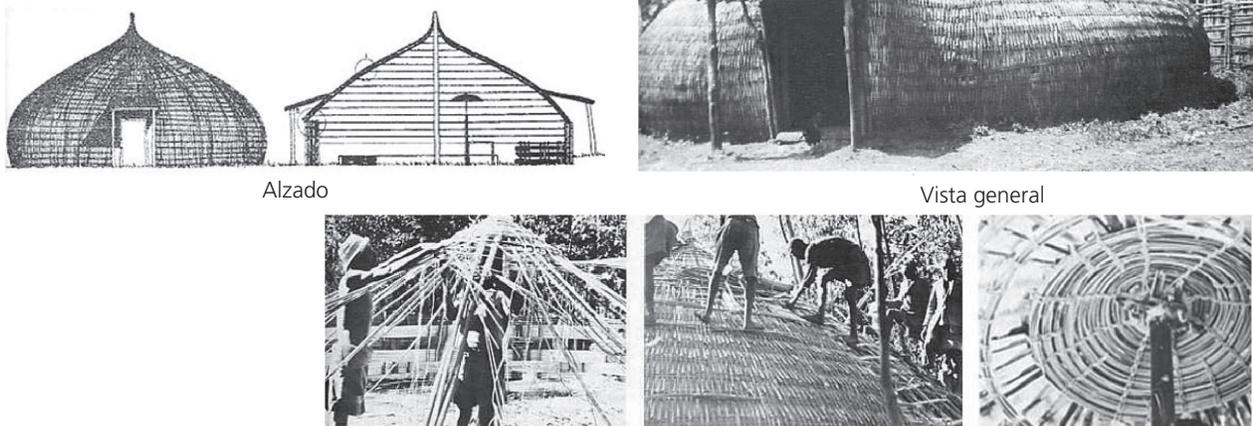
Como ya hemos mencionado, la falta de material obliga a desarrollar estrategias para sobrevivir y una

de estas estrategias fue la invención del pantograma. El "Pantógrafo" es un sistema articulado de barras llamado también sistema tijera que se basa en un nudo intermedio pivotante y dos ubicados en los extremos. Estos puntos pivotantes tienen total grado de libertad entre dos barras en el eje perpendicular del plano del pantógrafo. Las barras tienen igual dimensión de ambos lados del nudo central, con lo que se logra una estructura que se pliega y se despliega, cumpliéndose la condición geométrica que muestra el gráfico 4.

En el campo de la rapidez de montaje los cobijos nómadas de las culturas ubicadas en desiertos, praderas y explanadas constituyen una importante referencia de diseño e inventiva en función de su capacidad transportable y portátil de poco peso, dado que han desarrollado mecanismos para el traslado del cobijo. En este sentido, hay que hacer mención a la Yurta de Asia Central que constituye, sin duda, uno de los más interesantes y elaborados ejemplos de arquitectura de rápido montaje (gráfico 5).

La Yurta está ampliamente reseñada en la bibliografía, sin embargo, lo más destacable de este refugio es su enrejado plegable plano que luego es curvado uniendo sus lados extremos generando una planta circular. Está formado por listones de madera entre 4 a 6 cm de sección que al ser desplegados conforman un cerramiento vertical circular de 4 a 6 metros de diámetro. El mecanismo que

Gráfico 3  
Sidamo: vivienda étnica de Etiopía



Alzado

Vista general

Proceso de tejido del cobijo

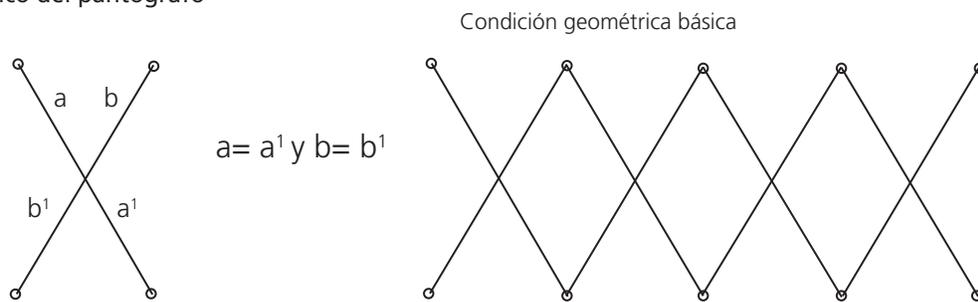
Fuente: Oliver, 1978.

hace posible este despliegado es un nudo formado por las barras pasantes, articulado en la unión por un hilo grueso y flexible de piel de camello. La cubierta es un cono truncado formado por barras de madera dispuestas en forma radial y unidas en el perímetro inferior con el cerramiento plegable mediante ataduras. En la parte superior las barras radiales se encuentran con un anillo de compresión rígido similar a una rueda de bicicleta, que a su vez sirve de respiradero e iluminación del espacio interior. Sobre este

esqueleto soportante se colocan esterillas, lonas y fieltros que varían de acuerdo al clima: en invierno se colocan tres capas y en verano se deja medio metro sin cubrir en la parte inferior del enrejado para aumentar la ventilación.

Estos cerramientos son atados con cuerdas que mantienen unida la piel a la estructura y le otorgan continuidad estructural, aunque en este caso el cerramiento no contribuye a la rigidización de la estructura y sólo cumple su misión de filtro ambiental. Todo este conjunto

Gráfico 4  
Esquema geométrico del pantógrafo

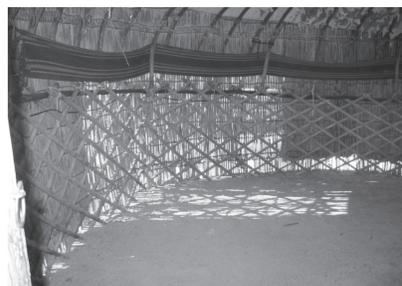


Fuente: elaboración propia.

Gráfico 5  
Yurta: vivienda efímera y transformable de Mongolia, Asia Central



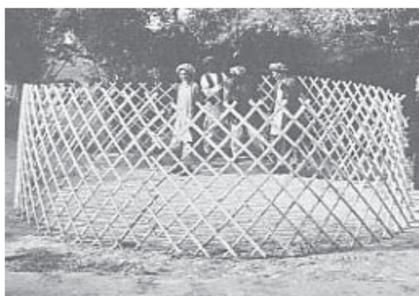
Vista general del cobijo



Vista interna



Punto alto del cobijo



Pantógrafo desplegado



Estructura completa



Pasador flexible de piel de camello

Fuente: Rafa, 2004.

es transportado por dos camellos cuya capacidad de carga es aproximadamente de 700 Kg. y el tiempo de montaje es de media hora.

### El arco

Según Eduardo Torroja en su libro *Razón y ser de los tipos estructurales* (2000) “[el arco] es una pieza curva que, resistiendo sólo o principalmente a compresión, transmite los pesos propios, y los que sobre él insisten, a dos apoyos distanciados entre sí”.

### Cobijo de las tribus nómadas Tuareg

Ubicados en el África septentrional en el desierto del Sahara con más de 8.000 kilómetros cuadrados, un espacio que pasa las fronteras de Marruecos, Argelia, Libia, Nigeria y Sudán, estos cobijos menos documentados por la

bibliografía especializada son tiendas de “Bóveda”, extremadamente móviles y ligeras que se construyen a partir de arcos formados por palos de madera flectados, anclados en el terreno y unidos o atados cerca de la clave del arco. Se atan debido a las pequeñas dimensiones de las ramas de los árboles del desierto (gráfico 6).

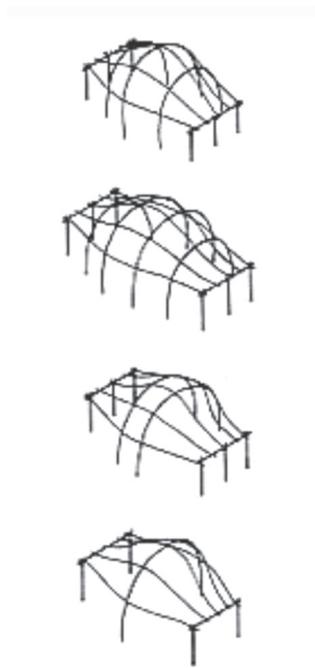
Por tratarse de arcos flectados, estos están previamente cargados con la fuerza inicial aplicada para flectar el palo de madera, y el radio de curvatura dependerá de las propiedades de la sección y longitud del palo de madera, por supuesto de la carga externa aplicada para lograr flectar el palo. Por lo tanto, en su estado más simple, el momento máximo de flexión de estos arcos empotrados en sus extremos, se puede expresar como:

$$M_{\max} = \frac{q L^2}{12}$$

Donde:

- M: es el momento máximo de flexión
- q: es la carga uniformemente repartida incluyendo el peso propio
- L: es la longitud del palo.

Gráfico 6  
Vivienda efímera de los Tuareg en el desierto de Sahara



Diferentes tamaños de cobijo



Vista general del cobijo



Proceso de montaje



Amarre en la clave del arco



Montaje del tejido

Fuente: Oliver, 1975.



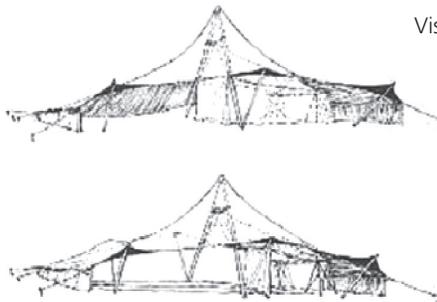
pletamente transportable, optimiza los recursos y reduce al mínimo la estructura soportante al no necesitar de un esqueleto tridimensional soportante como el Tipis norteamericano (estructura cónica formada por palos colocados radialmente sobre un perímetro circular y unidos en un punto alto), la Churuata amazónica o la Yurta mongol.

La jaima configura un espacio rectangular único, cuenta con un mástil central en forma de "V" invertida y unos palos de una altura de entre 1,50 a 1,70 metros ubicados en el perímetro del rectángulo y tiene un tiempo de montaje de entre media hora y una hora aproximadamente.

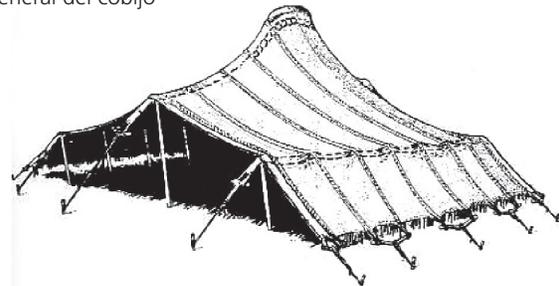
Gráfico 8  
Jaima (Marruecos).  
Vivienda efímera y transportable



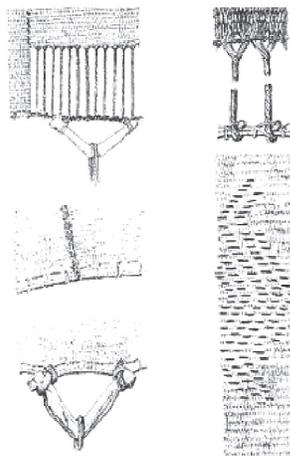
Vista general del cobijo



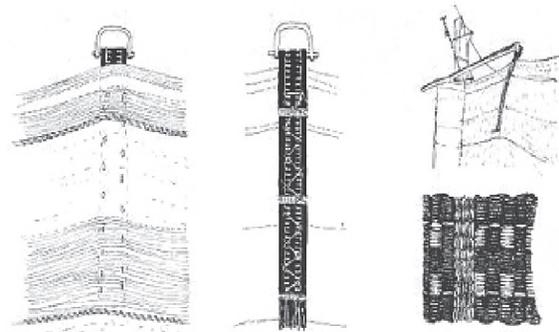
Estructura interna



Se observan los patrones que forman la membrana y los anclajes de estacas clavadas en el terreno.



Esquinas y bordes para entregar el tejido a los soportes



Cintas de unión entre los patrones que conforman la membrana.

Fuente: Oliver, 1975.

La cubierta es una lona única de lana tensada hacia el perímetro a través de unas cintas que se prolongan hasta el piso con una cuerda; esta tensión provoca una compresión en los palos del borde. La lona única está formada por paños de tela tejida de lana que tienen una anchura entre los paños de 45 cm a 65 cm, por una longitud de 13 a 15 metros. A estos paños se les denomina patrones y son de color marrón café y negro. Son elaborados por las mujeres, y aproximadamente unos 10 patrones se cosen entre sí a través de unas cintas tensoras de 3 a 4 cm de ancho para conformar toda la cubierta. Aunque los patrones de la lona son rectos la lona que conforman tiene una forma global trapezoidal. Las costuras se realizan sobre las líneas de máxima tensión y se hallan reforzadas con las cintas resistentes, mencionadas anteriormente, que además son objeto de decoración de la cubierta.

Las fibras de la lana son resistentes a la tracción y por ser de origen vegetal tienen un comportamiento bioclimático. El punto alto de la jaima lo conforma el mástil en forma de "V" invertida cuyos palos tienen una sección entre 4 a 5 cms y una longitud de 4,40 metros. Como los palos están inclinados la altura total de la jaima es de 3,50 metros. En el vértice de la "V" se coloca un pieza de madera de 28 cm de longitud, redondeada en su parte superior –que es la que tiene contacto con la lona– para que no la corte ni la desgare por efecto del roce producto de la presión a que estará sometida la lona al ser atirantada por el perímetro. En la parte inferior esta pieza tiene unos orificios por donde entran los palos del mástil en "V", otros dos palos inclinados colocados a los extremos inferiores de la "V" pero de menor altura que llegan al borde de la cubierta en su perímetro y producen los accesos.

La cubierta resiste al viento gracias a la combinación de formas alabeadas y como está atirantada por el perímetro evita que aparezcan compresiones, es decir arrugas. En este caso, la lona contribuye notablemente a la rigidización y estabilidad estructural ya que, como se ha dicho, forma parte de la estructura y está tensada. El profesor Frei Otto, en su tesis doctoral "Cubiertas colgantes", plantea que la tienda árabe "es el más antiguo soporte de la cultura transmitida conscientemente de generación en generación" (Frei, 1958). Y desde nuestra óptica constituye un tipo primario de vivienda humana para protegerse de la lluvia, el viento y el calor, que deja penetrar, en cantidad suficiente, la luz y el aire fresco para su ventilación.

## Conclusión

De los cobijos estudiados se puede concluir que las formas arquitectónicas y su estructura conforman una tendencia al conjugar una sola unidad, lo cual proporciona ventajas en la transmisión de las cargas. Estas son geometrías estructurales que, al funcionar tridimensionalmente, disminuyen de manera notable las secciones de los elementos y componentes estructurales rígidos, lo que se traduce en una reducción de los pesos. En efecto, construir implica el uso adecuado de técnicas y herramientas, y por ende de conocimiento previo de lo que se quiere realizar, aunque este conocimiento sea intuitivo, con sensibilidad mecánica e inspiración, características que son innatas al hombre.

El esqueleto del ser humano representa la expresión más genuina del principio de estructura por estar sometido a las leyes de las fuerzas externas como la gravedad y el viento y su mecánica estructural que le permite su estabilidad y resistencia. Los cobijos se comportan como el cuerpo humano que está compuesto de una estructura sustentante a compresión (huesos) unida y articulada por el sistema muscular que resiste las tensiones y cubierto por la piel que le otorga protección al conjunto, permitiendo además, ventilar. En este sentido, una característica importante de estas construcciones es que al tener comportamiento de malla funcionan igual que los huesos y músculos, tienen la propiedad de recibir cargas en muchas direcciones y conducir las a un punto deseado, en este caso la tierra. Esto demuestra que las diversas culturas tienen una mecánica estructural intuitiva, y a su vez clara y precisa de las leyes que rigen la transmisión de cargas. Si bien es cierto que estas culturas no conocen las explicaciones científicas de sus invenciones, está claro que la curva es un principio físico universal. El movimiento y giro de la tierra hace que la naturaleza tienda a construir con formas curvas y elípticas, como las trayectorias de las aves, los ríos y astros.

Las geometrías tridimensionales presentadas en este trabajo en forma de cobijos respetan las leyes del máximo rendimiento y mínimo material lo que las hace construcciones sostenibles. Por otra parte, estas construcciones alcanzan su rigidez por medio de las curvaturas. Las formas arquitectónicas alabeadas no sólo son adaptadas y apropiadas para las condiciones ambientales sino también adaptadas a las necesidades y requerimientos de quienes las habitan.

Las invenciones estudiadas (el tejido, el pantógrafo, el arco y la catenaria) están presentes en la arquitectura ligera contemporánea. Los tejidos industriales han alcanzado un alto grado de desarrollo en cuanto a capacidad para soportar grandes tensiones gracias a la invención de los polímeros, como por ejemplo el nylon y la fibra de vidrio, pero a su vez la debilidad de estos nuevos materiales es que pueden generar efecto invernadero en los espacios que cubren, ya que dejan pasar al espacio interior el 20% de la radiación debido a su poco espesor. En este sentido, los tejidos de los cobijos presentan la ventaja de dejar pasar el aire a través de ellos pero no el agua.

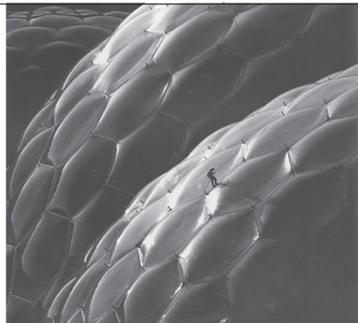
Con la aparición de nuevos materiales eficientes, ligeros y de altas resistencias se han reducido los espesores de las construcciones hasta llegar a nuestros días cuando el peso propio de una cúpula es incluso menor al peso del aire que envuelven, tal es el caso de la cubierta "The Eden Project" en Inglaterra, diseñada por el arquitecto Nicholas Grimshaw (gráfico 9), cúpula formada por almohadones neumáticos de lámina plástica de poco espesor, con aire comprimido internamente y estructura de marcos de aluminio.

La invención del pantógrafo es la base fundamental del desarrollo de las estructuras transformables actuales, pudiéndose plegar y desplegar grandes estructuras en forma de bóvedas y cúpulas que cubren grandes luces como por ejemplo el ESTRAN-1 desarrollado por el profesor Carlos Hernández en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC-FAU/UCV) (gráfico 10).

De la invención de flexar un elemento para obtener un arco se puede esperar mucho en el futuro cercano. La idea de pre-flexar un elemento rígido, de manera que cuando actúa la carga externa sobre el material lo que se produce es una disminución de la compresión inicial, genera una estructura muy eficiente y una relación peso/resistencia muy favorable. En esta dirección se orienta la cubierta de malla pre-flexada para Multi-Hall. Mannheim del arquitecto Otto Frei abre nuevas posibilidades a la arquitectura (gráfico 11).

Todo el repertorio constructivo de la tienda árabe conformada por mástiles, patrones de tela, tensores, anclajes, superficies alabeadas de doble curvaturas, cintas y cuerdas para transmitir las cargas de la lona a los elementos de compresión se encuentra presente en la arquitectura textil contemporánea y, en ese contexto, la clásica

Gráfico 9  
The Eden Project  
Detalle



Fuente: www.edenproject.com

Gráfico 11  
Multi-Hall. Mannheim

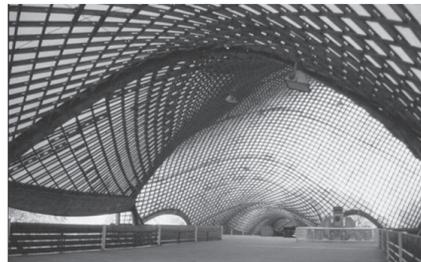


Foto: Nelson Rodríguez.

Gráfico 10  
ESTRAN-1. Arquitectura ligera contemporánea

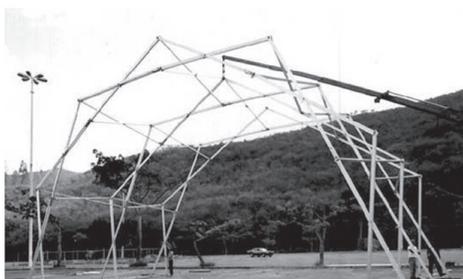


Foto: Nelson Rodríguez.

Gráfico 12  
Carpa clásica de circo



Foto: Nelson Rodríguez.

carpa de circo representa uno de sus ejemplos más notables (gráfico 12).

Este salto que el mundo de las estructuras está experimentando ha sido posible por la aparición de materiales cuyo peso propio y rigidez son casi despreciables, pero trabajadas bajo una lógica estructural que las hace poco deformables aun solicitadas por cargas externas. Esta aparente contradicción se resuelve con el empleo de dos conceptos básicos: el primero es la introducción de una fuerza inicial al material, es decir pre-traccionarlo, pre-comprimirlo, o pre-flectarlo. El segundo concepto es el uso de super-

ficies de dobles curvaturas, bien sean sinclásticas (doble curvatura en un mismo sentido como las bóvedas y copulas) o anticlásticas (doble curvatura en sentidos opuestos como los paraboloides o conoides). Si además a estas estructuras les pedimos que sean capaces de replegarse, moverse y erigirse en otro lugar, la complejidad aumenta considerablemente. Esto demuestra que queda mucho que aprender, asimilar y derivar de los cobijos primigenios que combinados con las posibilidades del desarrollo tecnológico actual abre nuevos horizontes a las formas arquitectónicas y a la mecánica estructural.

## Referencias bibliográficas

- Andrews, P. (1981). *The Turkmen Tent*. HALI Books & Annuals, U.K.
- Berger, H. (1996) *Light structures structures of light: the art and engineering of tensile architecture*. Basel Birkhäuser, cop.
- Bunn, S. (2002) "Viviendas autóctonas flexibles y móviles", en *Living in Motion. Diseño y arquitectura para una forma de vida flexible*. Vitra Desing Museum. Zurich.
- Escrig, F. (1995) *Mobile and Rapidly assembled structure*, vol. I y II. Mechanis Publications. Sevilla.
- Frei, O. (1958) *Cubiertas colgantes* (versión española por Francisco Folguera). Editorial Labor. Barcelona.
- Frei, O. (1973) *Estructuras, estudios y trabajos sobre construcción ligera*. Gustavo Gili. Barcelona.
- Frei, O. (1990) *Experiments. Form, force and mass*. IL-23. Institute for Lightweight Structures. Stuttgart
- Frei, O.; Rasch, B. (1995) *Finding form: towards an architecture of the minimal*. Edition Axel Menges. Munich.
- Gantes, C. (2001) *Deployable Structure: Analysis and Design*. Wit Press. Boston.
- Gasparini, G. (1992) *Arquitectura Popular en Venezuela*. Armintano Editores. Caracas.
- Gardi, R. (1973) *Indigenous African Architecture*. Van Nostrand Reinhold Edition. London.
- Gili, G. (2002) *Casas refugio*. Editorial Gustavo Gili. Barcelona.
- Giralt, D. (2002) *Gaudí. La búsqueda de la forma*. Museu d'Història de la Ciutat. Barcelona.
- Hildebrandt, S. (1990) *Matemática y formas óptimas*. Prensa científica, Biblioteca Scientific American. Barcelona.
- Kadlcák, J. (1995) *Statics of suspension cable roofs: Jaroslav Kadlcák*. Rotterdam Brookfield. A. A. Balkema, Rotterdam.
- Mollaer, M. (2002) *The Design of membrane and lightweight structure*. University Press. VUB. Bruselas.
- Monjó, J. (1991) *Introducción a la arquitectura textil: cubiertas textiles*. COAM. DL. Madrid.
- Oliver, P. (1975) *Shelter in Africa*. BLACKWELL, Publishing, Oxford.
- Parker, J. E. S. (1974) *The economics of Innovations*. Longman. London.
- Rafa, M. (2004) Vida Nómada. La Atracción de la Estepa. *Revista Altaïr* Nº 29. Mayo - Junio. Editorial Altaïr. Barcelona.
- Tahan, M. (2003) *El hombre que calculaba*. Eduven. Caracas.
- Torroja, E. (1960) *Razón y ser de los tipos estructurales*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Zalewski, W. (1998) "Shaping structures statics". Waclaw Zalewski and Edward Allen drawings by Joseph Iano. New York.