

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

Máster Oficial en Eficiencia energética



Trabajo Final de Máster

Propuesta de Medidas de Mejora de la Eficiencia Energética y del Bienestar Térmico de los Edificios de Viviendas en los Campamentos de Refugiados Saharauis en Tinduf

TATEH LEHBIB BARIKA



Tutores: Alejandro Ramos Martínez

Ricardo Aguasca Colomo

29 de Noviembre de 2015

*A la digna lucha del pueblo
saharaui por su libertad*

Resumen

Las condiciones climáticas extremas que se viven en un desierto son irreversibles: altas temperaturas, devastadoras tormentas de arena y esporádicas lluvias arrasadoras.

Partiendo del análisis de la situación de la vivienda actual en los campamentos de refugiados saharauis, esta investigación profundiza en posibles modelos de mejora de su eficiencia energética (dadas las características climáticas y geológicas del entorno) partiendo de técnicas milenarias, combinadas con prácticas actuales de construcciones ecológicas, que mantienen el uso de los materiales del entorno y de la mano de obra local, para redundar en resultados beneficiosos y tangibles en la vida diaria en las viviendas de adobe.

Quiero lograr que la vida en los campamentos además de ser provisional y digna, sea más cómoda y práctica.

Índice general

Índice de figuras	XVIII
Índice de cuadros	X
1. Introducción	1
2. Marco teórico y práctico	3
2.1. Marco teórico	3
2.1.1. El conjunto del Sáhara	3
<i>En los campamentos de refugiados</i>	4
2.1.2. Rasgos generales en relación al clima	7
<i>Precipitaciones</i>	12
<i>El tiempo</i>	12
<i>La acción eólica</i>	12
<i>Situación geológica</i>	13
2.1.3. Consideraciones generales con respecto	
a las aguas subterráneas	14
<i>Generalidades de las aguas subterráneas</i>	14
<i>Características hidrogeológicas de las hamadas</i>	15
2.1.4. Viviendas saharauis	16
<i>La jaima, vivienda por excelencia de los saharauis</i>	17
<i>Evolución de la vivienda en los campamentos</i>	20
<i>Jaimas</i>	21
<i>Casas enfoscadas con cemento</i>	22
2.2. Marco práctico	23
2.2.1. Casa tipo	23
2.2.2. Objetivos	26
2.2.3. Proceso constructivo.	26
3. Diagnóstico energético del edificio de viviendas tipo	27
3.1. Materiales de construcción y sus características	27
3.2. Análisis energético de los edificios de viviendas	30

3.3. La transferencia de calor	32
4. Propuestas de medidas de mejora de la eficiencia energética y del bienestar térmico	35
4.1. Solución 1	35
4.1.1. Dificultad de elaboración	36
4.1.2. Obtención de materiales	37
<i>La bóveda nubiana</i>	38
<i>Orígenes de la técnica.</i>	38
<i>La estructura</i>	39
<i>Utilización de materiales simples</i>	39
<i>Con herramientas básicas</i>	40
<i>Una técnica asequible y con garantías</i>	40
<i>Costes</i>	40
<i>Etapas de la construcción</i>	41
<i>Ventajas</i>	44
4.2. Solución 2	46
4.2.1. Dificultad de elaboración	47
4.2.2. Obtención de materiales	47
4.3. Solución 3	48
4.3.1. Dificultad de elaboración	49
4.3.2. Obtención de materiales	49
5. Estimación del efecto de las mejoras propuestas	51
5.1. Mejoras del adobe	51
5.2. Simulación FreeFem	53
5.2.1. Vivienda tipo	59
5.2.2. Solución 1	61
5.2.3. Solución 2	63
5.2.4. Solución 3	65
5.3. Transferencia de calor en la solución definitiva	68

6. Conclusiones y líneas futuras	70
6.1. Conclusiones	70
6.1.1. Otras ventajas.	71
6.1.2. Algunas desventajas	74
6.2. Líneas futuras	74
6.2.1. El mucílago de nopal o savia de penca como impermeabilizante . 74	
<i>Composición</i>	77
6.2.2. Chimeneas solares	78
 Bibliografía	 80
Anexo	83

Índice de figuras

2.1.	Vista del desierto sahariano	4
2.2.	Localización de Tinduf	5
2.3.	Las wilayas	6
2.4.	Esquema de la circulación de las aguas subterráneas en las Hamadas .	15
2.5.	Panorámica de los campamentos saharauis	16
2.6.	La jaima tradicional.	17
2.7.	Jaima de pelo de camello	19
2.8.	Tipos de viviendas	21
2.9.	Tipos de jaimas	21
2.10.	Casa de adobe	22
2.11.	Casas enfoscadas con cemento	22
2.12.	Casa tipo	23
2.13.	Conjunto de viviendas	24
2.14.	Barrios	24
2.15.	Auserd	25
2.16.	Tinduf	25
3.1.	Adobe, el material más asequible.	26
3.2.	Chapa de zinc	29
3.3.	Vivienda tipo	30
3.4.	Esquema de ventilación	32
3.5.	Transferencia de calor paredes	33
3.6.	Transferencia de calor techo	34
4.1.	Solución 1	36
4.2.	Bóveda nubiana	38

4.3.	Estructura bóveda nubiana	. . . . .	39
4.4.	Materiales para la construcción	. . . . .	39
4.5.	Herramientas básicas	. . . . .	40
4.6.	Preparar los ladrillos	. . . . .	41
4.7.	Ladrillo muro	. . . . .	42
4.8.	Ladrillo bóveda	. . . . .	42
4.9.	Cimientos	. . . . .	42
4.10	Frontón	. . . . .	43
4.11	Bóveda	. . . . .	43
4.12	Acabado con canaletas	. . . . .	44
4.13	Solución 2	. . . . .	47
4.14	Circulación del aire	. . . . .	47
4.15	Solución 3	. . . . .	49
4.16	Solución 3 en la daira	. . . . .	49
4.17	Solución 3 panorámica	. . . . .	50
5.1.	Esquema explicativo	. . . . .	53
5.2.	FreeFem	. . . . .	53
5.3.	Planteamiento del modelo	. . . . .	54
5.4.	Vivienda tipo	. . . . .	59
5.5.	FreeFem vivienda tipo	. . . . .	59
5.6.	Temperatura interior vivienda tipo	. . . . .	60
5.7.	Solución 1	. . . . .	61
5.8.	FreeFem solución 1	. . . . .	61
5.9.	Temperatura interior vivienda tipo	. . . . .	62
5.10.	Temperatura interior solución 1	. . . . .	62
5.11.	Solución 2	. . . . .	63
5.12.	FreeFem solución 2	. . . . .	63
5.13.	Temperatura interior solución 2	. . . . .	64
5.14.	Solución 3	. . . . .	65
5.15.	FreeFem solución 3	. . . . .	65
5.16.	Temperatura interior solución 3	. . . . .	66
5.17.	Comparativa soluciones Freefem	. . . . .	67

5.18.	Esquema comparativo. . . . .	.68
5.19.	Esquema transferencia de calor . . . . .	.68
5.20.	Comparativa de confort térmico	70
6.1.	Nopal. . . . .	.74
6.2.	Chimenea solar . . . . .	.78
6.3.	Interior chimenea solar . . . . .	.79

Índice de cuadros

2.1.	Medias y totales mensuales	8
2.2.	Valores climáticos medios y totales anuales	9
2.3.	Fenómenos extraordinarios	10
2.4.	Temperatura, viento y presiones en un día	11
2.5.	Tipos de viviendas	21
3.1.	Propiedades térmicas del adobe	28
3.2.	Chapa de zinc	29
3.3.	Propiedades térmicas de la vivienda tipo	31
5.1.	Mejoras térmicas con adobe	51

Introducción

El diseño y construcción de las viviendas en los campamentos de refugiados saharauis, se ha ido modificando y renovando con el paso de los años. A pesar de que la población sigue sintiendo y defendiendo que su estancia como refugiados es algo provisional, lo cierto es que tras cuatro décadas de vivir en ese inhóspito entorno, les ha llevado a concebir sus casas, sus barrios y sus provincias, de otra manera.

Frente a las tradicionales jaimas (vivienda por antonomasia de este pueblo) que eran las únicas viviendas que había durante los primeros 10 años; luego fueron surgiendo viviendas de adobe que permitían otras condiciones de seguridad y comodidad. Y es ahora, en los últimos años, que incluso encontramos viviendas enfoscadas con cemento.

En la actualidad, las casas de adobe constituyen aproximadamente el 80% de las viviendas existentes.

Sin embargo, precisamente por el sentimiento de transitoriedad que vive la población, los cambios en las viviendas han sido mínimos si tenemos en cuenta el tiempo transcurrido y el reducido confort térmico presente en las mismas.

En la presente investigación comenzamos por un breve recorrido por la historia que nos sitúa en el lugar y la problemática concreta que vamos a intentar abordar: Las posibles medidas de mejora de la eficiencia energética y del bienestar térmico de los edificios de viviendas en los campamentos refugiados saharauis en Tinduf.

Así los objetivos principales de la presente investigación son:

- Mejorar el confort térmico de las viviendas
- Desarrollar mayor eficiencia energética en las mismas
- Disminuir los costes económicos a largo plazo

Tras un estudio pormenorizado de modelos de construcción de países con condiciones climáticas y culturales similares, la investigación se enriqueció de prácticas de Egipto, Mali o Burkina faso, con la bóveda nubiana; de aprendizajes de eficiencia energética en el Máster Universitario en Eficiencia Energética con estudios sobre los flujos de calor y sus comportamientos y simulaciones; de técnicas de rendimiento en materiales como el adobe en prácticas latinoamericanas; así como de la experiencia e innovaciones que el entorno de los campamentos va generando.

La investigación se desarrolla en cuatro movimientos. Comienza con la contextualización del entorno físico y geográfico de los campamentos para determinar con exactitud las condiciones de vida, de la vivienda y del clima al que están expuestos. Continúa con el diagnóstico energético de los edificios de vivienda actuales, analizando los

materiales que se utilizan para su construcción, sus características y cómo se produce la transferencia de calor en las viviendas actuales, subrayando los evidentes inconvenientes de la vivienda actual.

Más adelante hace propuestas de medidas de mejora de la eficiencia energética y del bienestar térmico presentando tres soluciones, que acumulativamente desembocan en la última solución que contiene propuestas de cambios de la vivienda tradicional en su estructura, en su interior y en su exterior.

El cambio fundamental y determinante en los resultados positivos de esta investigación es la incorporación de la bóveda nubiana, una técnica ancestral egipcia que se aplicaba desde hace miles de años en un entorno muy similar al que analizamos aquí y que ofrece unas ventajas impresionantes en cuanto a las condiciones térmicas de las viviendas.

Finalmente se expone la estimación del efecto de las mejoras, mediante cuadros comparativos, gráficos y una simulación de los flujos de calor en las distintas propuestas mediante el simulador FreeFem, que permite la visualización del estrés o confort térmico en las viviendas a golpe de vista.

Además de todo esto, el enfoque de la investigación parte de una contextualización ventajosa, ofrecida por la circunstancia de que la perspectiva de la problemática ha sido no sólo analizada, sino también vivida en primera persona por el autor de la investigación.

Asimismo, se trata de una propuesta innovadora porque no sólo ofrece múltiples cambios fruto de búsquedas en técnicas antiguas y locales, sino que pretende instaurarse en el contexto mismo del que surge, cambiando la forma de vida de mucha gente. Por tanto, posee un gran valor dado su pragmatismo social.

Y es precisamente su investigador el actor del cambio; quien después de desarrollar toda una búsqueda y ensayo de varias técnicas, materializará los cambios empezando por su casa, su entorno, su pueblo; pretendiendo extender la práctica, al tiempo que profundice en líneas futuras de investigación y mejora.

2. Marco teórico y práctico

2.1. Marco teórico

Cuarenta años han pasado desde que mi abuela Koría llegó junto con los primeros refugiados saharauis a Tinduf en Argelia. Venían con “lo puesto”, tras una larga travesía a lo largo del desierto huyendo de la invasión marroquí, arrastrando las penurias del hambre, la separación, la huida de sus casas, el miedo a perder a sus maridos e hijos; al tiempo que eran bombardeados. En el trayecto, mi madre, Jadem, fue herida.

Llegaron a la Hamada, a un lugar conocido como el infierno, donde apenas crece nada y por supuesto no vivía nadie. Despojados de su tierra y completamente desarraigadas, fueron las mujeres quienes empezaron a construir nuestro hogar partiendo de la nada.

A pesar de que el sentir general de mi pueblo fue desde un principio el de provisionalidad en el exilio, nuestras abuelas y madres organizaron todo: el funcionamiento de las escuelas, los hospitales, la ayudas...

Pensando que se cumplirían las promesas de devolvernos nuestra tierra, los saharauis vivimos durante muchos años en jaimas, creyendo en las promesas de referéndum y descolonización. Fue más tarde que comenzaron a organizarse en provincias (wilayas) y en barrios (dairas) y comenzaron las construcciones de casas de adobe.

Mi abuela y mi madre construyeron las suyas con sus propias manos, donde vivo hasta hoy.

Yo, Tatah Lehbib Barika nací refugiado en los campamentos saharauis en Argelia y nunca he visto mi país. Sigo esperando poder volver a mi tierra, pero tristemente el tiempo pasa sin que quienes tienen en su mano devolvernos la libertad, muevan un solo dedo por hacer justicia. Para que nuestra vida en los campamentos además de digna pueda ser más cómoda y más sencilla, quiero plantear algunos cambios en las viviendas de mi pueblo que optimicen los recursos del medio creando mejores condiciones de vida y comodidad.

Situándonos en el entorno

2.1.1. El conjunto del Sáhara

El Sáhara es el más vasto desierto de la Tierra. Su extensión superficial iguala a la de la misma Europa, y las distancias medias que separan los que pueden considerarse como límites de este dilatado territorio, vienen siendo de 5.400 Km en el sentido de los paralelos, y de unos 1.800 Km en el de los meridianos. Territorio inmenso, en el que la aridez

climática se extiende e imprime sus peculiares rasgos en territorios tan distanciados, que pueden así agruparse bajo un mismo conjunto.



Figura 2.1: *Vista del desierto sahariano*

El conjunto sahariano se caracteriza por la escasez y monotonía del relieve: el dominio topográfico en este amplio desierto corresponde a las formas tabulares, a las pandas y suaves depresiones, rellenas frecuentemente por las masas arenosas del aporte eólico e incluso fluvial; los horizontes infinitos de las plataformas de las <<hamadas>> y de las dilatadas superficies de arrasamiento, constituyen, conjuntamente con los depósitos arenáceos de los <<erg>> o desiertos de arena, la característica general del Sáhara.

Las **hamadas** vienen a ser amplias mesetas de superficie horizontal terminadas marginalmente, en la mayoría de los casos, por un escarpe o zona de cuesta más o menos patente. Recuerdan, por su aspecto morfológico, a las clásicas formaciones de los páramos castellanos, si bien con formas más grandiosas e impresionantes, tanto por su extensión como por su mayor aridez.

Estas grandes extensiones, accidentadas en algunos reducidos casos por hundimientos de la superficie, provocados por la acción disolvente de las aguas infiltradas, son, por su aridez extrema y gran extensión, incluidas entre los lugares más inhóspitos del desierto.

Y son precisamente las hamadas las que cobran para nosotros un lugar especial en nuestro estudio por tratarse del lugar estratégico de desarrollo de nuestro marco teórico y práctico, en el que profundizaremos más adelante.

Por lo que respecta a la **hidrografía** del lugar, podemos decir que como consecuencia de las especiales condiciones climáticas del Sáhara y del dominio de las formas tabulares, el régimen hidrográfico en este desierto presenta características peculiares. La actual aridez, en algunos casos, llega a ser tan extremada, que existen

lugares en los cuales las precipitaciones acuosas son totalmente nulas durante el transcurso de varios años, lo cual es causa de la extremada pobreza y aun de la falta de verdaderos cursos fluviales bien definidos.

En la actualidad, solamente mantienen cierta actividad los uadi, que teniendo su nacimiento en las cadenas marginales montañosas, reciben el aporte de las lluvias más abundante de esta región.

La red hidrográfica puede decirse que prácticamente no existe para estas zonas más meridionales, ya que faltan propiamente los cursos definitivos de agua. Ligeras excavaciones de contornos no bien delimitados, unas veces más claramente manifiestas, y en otros casos apenas perceptibles, constituyen los únicos indicios de la probable dirección que habrán de seguir las aguas de lluvia cuando ésta caiga. El destino final de estas aguas es, en gran parte, el de su rápida reintegración a la atmósfera por el proceso de la evaporación o el de su estancamiento en depresiones cerradas.

La enorme aridez de estas regiones y la falta de relieves acusados, son las razones que explican la ausencia en la misma de una red hidrográfica manifiesta.

En los campamentos de refugiados

Los campamentos de refugiados saharauis se sitúan geográficamente en la parte centro-occidental del desierto argelino, próximos a la ciudad de Tindouf y cercanos a la frontera entre Marruecos, Argelia y la ex provincia española del Sahara Occidental.

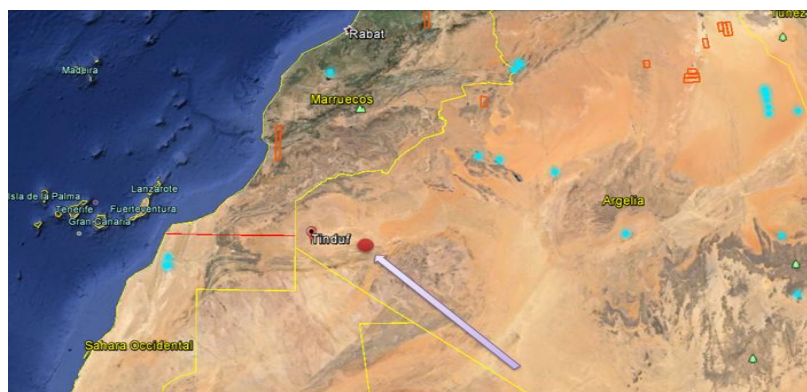


Figura 2.2: *Localización de Tindouf*

El entorno es muy severo. Nada crece allí y la gente está frecuentemente expuesta a duras tormentas de arena. Por si fuera poco, la temperatura es un grave problema para vivir allí.

Los campamentos se estructuran en cuatro grandes núcleos poblacionales (denominados “wilayas”) con los nombres de Aaiún, Dajla, Auserd y Smara. Cada wilaya se divide en 6 o 7 “dairas” o distritos, que facilitan la estructura organizativa. También

existen algunos núcleos más pequeños, fundamentalmente el “27 de Febrero”, que se fue creando en las cercanías de una escuela secundaria para mujeres y Rabouni, centro neurálgico y administrativo donde se encuentran los ministerios de la de la República Árabe Saharaui Democrática. Todos los campamentos y núcleos se sitúan cerca de la ciudad argelina de Tindouf, excepto Dajla, que se localiza 200 Km más al sur. El resto de campamentos están separados por distancias de entre 9 y 30 Km.

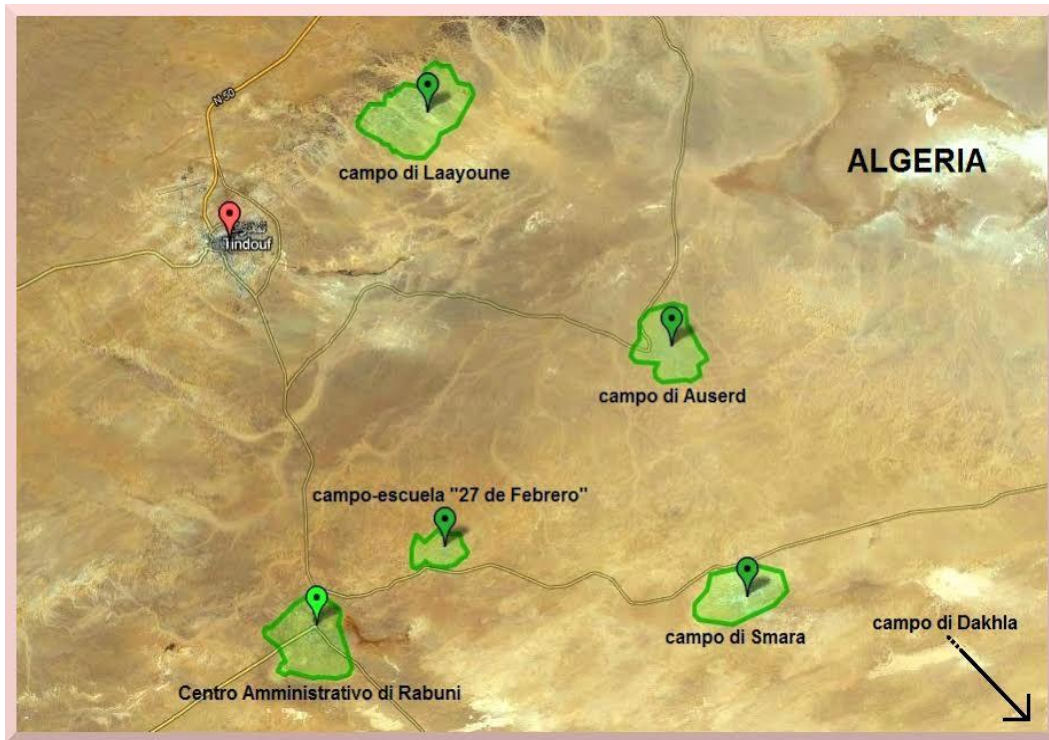


Figura 2.3: *Las wilayas*

La zona se caracteriza por una topografía muy poco accidentada. Está formada por amplias llanuras de desierto rocoso llamadas Hamadas. Estas están atravesadas por los lechos de una red de riachuelos efímeros llamados Wadis, que desembocan en lagunas también efímeras llamadas Sebkhhas. Los cordones de zonas elevadas que constituyen la divisoria entre Wadis se llaman Krebs. Los campamentos del norte (Auserd, Aaiún y Smara; véase Figura 2) están situados en la Hamada de Tindouf. Estos campamentos se sitúan a una cota entorno a los 350-400 m de altitud, mientras que el campamento de Dajla se encuentra en un oasis fuera de la Hamada, a unos 310 m de altitud.

Las zonas de explotación de los recursos hídricos subterráneos para abastecer a la población refugiada se sitúan en los alrededores de los campamentos de El Aaiún, Rabouni y Dajla.

2.1.2. Rasgos generales en relación al clima

Ya la denominación de Sáhara, femenino de Ashar, indica que estamos en presencia de un país árido, poco lluvioso, pues tal denominación pudiera traducirse por <<rojizo>>, más tarde tal palabra venía a significar <<país no cultivado>>, lo que determinó que Sáhara y desierto viniesen a ser lo mismo.

No depende, como en un principio se opinó, el clima del escaso relieve, ni de la constitución geológica de sus formaciones. El clima del Sáhara está determinado por la posición geográfica que ocupa, eminentemente tropical y, por ello, domina en toda su zona occidental el régimen alisio, que abarca el conjunto de nuestra zona. El ambiente es árido de fuertes contrastes, fundamentalmente respecto a sus regímenes térmicos, lo que contribuye a la íntima acción erosiva que efectúa sobre las rocas la intemperie.

La razón fundamental de la aridez del Sáhara es la distribución de la presión atmosférica y, fundamentalmente, el régimen de vientos.

Las clasificaciones climáticas mundiales de Martonne (1964) y Viers (1968), incluyen la zona de estudio entre el clima de tipo sirio y de tipo sahariano, mientras Strahler y Strahler (1989) lo clasifican como desértico. Todos ellos coinciden en que este tipo de clima se caracteriza por temperaturas cálidas y alta irregularidad de las precipitaciones. El clima sahariano pertenece al verdadero desierto, con precipitaciones muy escasas e irregulares. En la zona norte del desierto del Sahara, las lluvias, cuando existen, se concentran en los meses de invierno. El clima sirio afecta a los bordes templados de los desiertos subtropicales. Es la degeneración desértica de los climas mediterráneos con lluvias invernales y estepas de herbáceas o semileñosas (Viers, 1976). La casi inexistente vegetación en la zona y las escasísimas lluvias denotan que el clima de la zona se aproxima más al tipo sahariano.

Cientos de miles de personas se han visto obligadas a vivir durante todo este tiempo en los campos de refugiados, creando una arquitectura y un urbanismo muy característicos y peculiares.

Temperatura

Sabido es que el Sáhara es una de las regiones en la que se han registrado las más altas temperaturas pudiendo llegar a los casi 47°C. Observemos en las siguientes tablas los valores que completan una idea sobre la temperatura diaria, mensual y anual, así como las incidencias específicas a lo largo del año.

	T	TM	Tm	H%
enero	14.4	22.2	7.4	37.5
febrero	16.7	25.2	8.7	31
marzo	20.5	28.4	12.3	25.6
abril	24.7	33.1	15.8	21.1
mayo	28	36.4	19.2	22.7
junio	28	36.4	19.2	22.7
julio	33.1	41.9	24.3	19.1
agosto	35.6	43.5	26.8	19.2
septiembre	30.6	38.1	23.3	27.5
octubre	26.8	34.5	19.3	23.4
noviembre	18.7	25	13	50.6
diciembre	13.9	20.2	8.2	49.4

T	Temperatura media (°C)
TM	Temperatura máxima (°C)
Tm	Temperatura mínima (°C)
H	Humedad relativa media (%)

Cuadro 2.1: *Medias y totales mensuales*

Temperatura media (T):

Como vemos en la tabla, la temperatura en la columna uno es la temperatura media mensual, observamos en ella que los tres meses más calurosos en el año son julio, agosto, septiembre donde llega la temperatura máxima en ellos hasta 35.6°C y disminuye en diciembre llegando a 13.9°C.

Temperatura máxima(TM):

En la columna dos tenemos la temperatura máxima observamos

Las temperaturas máximas medias en los campamentos registrada en el año, oscilan entre los 38.1°C y los 43.5°C en los meses más calurosos (Julio, agosto y diciembre), y entre los 20.2 °C y los 25 °C registrados en los meses de diciembre, enero, febrero.

La temperatura mínima (Tm):

En la última columna representan los valores de las temperaturas mínimas medias registradas en largo del año , Las medias de las temperaturas mínimas mensuales oscilan entre los 13 °C y los 7.4 °C a lo largo de los meses más fríos, noviembre, diciembre y enero, y valores de entre 22.7°C y 19.2°C en los meses de verano julio, agosto y septiembre.

Datos	Valor	Días computados
Temperatura media anual:	24.4°C	364
Temperatura máxima media anual:	32.3°C	364
Temperatura mínima media anual:	16.5°C	364
Humedad media anual	29%	362
Precipitación total acumulada anual:	214.10 mm	364
Visibilidad media anual:	10.7 Km	363
Velocidad del viento media anual:	18.5 km/h	364

Cuadro 2.2: *Valores climáticos medios y totales anuales*

En la siguiente tabla se indican los valores de Humedad y la temperatura media con la velocidad del viento media durante todo el año, en la tabla interior la humedad registrada es muy baja 29% y eso debido al clima seco y la lejanía del mar, también vemos que la temperatura media anual es 32.3°C y eso por el los tres meses del verano que superan a 35°C, la velocidad media anual del viento es 18.5 km/h

Días con lluvia:	15
Días con nieve:	0
Días con tormenta:	12
Días con niebla:	1
Días con tornados o nube embudo:	1
Días con granizo:	0















Cuadro 2.3: Fenómenos extraordinarios































La temperatura más alta registrada fue de 46.6°C el día 18 de Julio.

La temperatura más baja registrada fue de 1.5°C el día 1 de Enero.

La velocidad de viento máxima registrada fue de 77.8 km/h el día 5 de Noviembre.

Jueves 14 de Agosto de 2014

Hora	Estado		Temp	Viento		Humedad	Presión
0:00		Nubes dispersas	36°C		15 km/h	14%	1010 hPa
1:00		Despejado	35°C		15 km/h	16%	1011 hPa
3:00		Despejado	32°C		11 km/h	17%	1010 hPa
4:00		Despejado	31°C		15 km/h	18%	1010 hPa
5:00		Despejado	30°C		19 km/h	21%	1010 hPa
6:00		Despejado	30°C		19 km/h	21%	1010 hPa
7:00		Despejado	29°C		11 km/h	22%	1010 hPa
8:00		Despejado	29°C		15 km/h	22%	1011

							hPa
9:00		Despejado	32°C		11 km/h	17%	1011 hPa
10:00		Despejado	37°C		13 km/h	13%	1011 hPa
11:00		Despejado	40°C		7 km/h	10%	1012 hPa
12:00		Despejado	41°C		11 km/h	10%	1012 hPa
13:00		Despejado	44°C		15 km/h	9%	1011 hPa
14:00		Nubes dispersas	45°C		En calma	N/D%	1011 hPa
15:00		Nubes dispersas	45°C		En calma	N/D%	1010 hPa
16:00		Nubes dispersas	46°C		En calma	N/D%	1010 hPa
17:00		Parcialmente cubierto	45°C		En calma	N/D%	1009 hPa
18:00		Parcialmente cubierto	45°C		En calma	N/D%	1009 hPa
19:00		Parcialmente cubierto	44°C		11 km/h	N/D%	1009 hPa
20:00		Parcialmente cubierto	43°C		26 km/h	N/D%	1009 hPa
21:00		Nubes dispersas	41°C		30 km/h	N/D%	1010 hPa
22:00		Nubes dispersas	39°C		22 km/h	9%	1010 hPa
23:00		Nubes dispersas	37°C		11 km/h	12%	1011 hPa

Cuadro 2.4: Temperatura, viento y presiones en un día

En este cuadro hemos podido ver desglosadas las temperaturas a lo largo de un día, así como las variaciones de presión y de viento.

En el anexo 1 adjunto para mayor profundización más valores concretos y generales a propósito de las temperaturas.

Precipitaciones

El carácter climatológico más típico del Sáhara es la escasez, la rareza de las precipitaciones. La lluvia no es desconocida, ni mucho menos, pero es siempre rara y accidental. Sólo en determinadas ocasiones los chaparrones son frecuentes e intensísimos.

Sin embargo, la sequedad del ambiente es siempre muy grande, y llega a ser casi absoluta hacia el interior, debido a la extraordinaria evaporación.

El tiempo

El tiempo, en relación con el clima, puede decirse que se mantiene a lo largo del año muy constante, siendo los cambios poco frecuentes y de escasa duración. Es bastante uniforme, caracterizándose fundamentalmente por la irregularidad y escasez de las precipitaciones en todo el territorio, por los contrastes de la temperatura hacia el interior, tanto durante el día como fundamentalmente a lo largo del año.

Tanto en invierno como en verano molesta el viento. La violencia, su constancia y su temperatura extrema hacen realmente complicada la vida en estos parajes.

La acción eólica

Todo el territorio que venimos estudiando está sometido fundamentalmente al régimen del viento alisio, muy constante y fuerte, siendo la labor erosiva provocada por él sumamente enérgica y constante. La acción eólica es la fundamental en este lugar, acción que es en general relativamente rápida, extensa y sumamente típica.

Los vientos provenientes en su mayoría del NO y NE domina en el conjunto de los días; siendo los días de calma raros, salvo en pleno invierno.

Por ello, y hacia el interior, la atmósfera suele estar casi siempre enturbiada por polvo constituido por pequeñísimas partículas minerales.

En los días de vendaval, con vientos que pueden soplar a velocidades de 45-50 km. Por hora, el transporte a ras del suelo de materiales arenosos es extraordinario, viéndose cómo las ráfagas más fuertes arrastran velozmente masas de arena y polvo no arcillosos que zigzaguean rastreras, desplazándose en la dirección de aquél.

En estas ocasiones, se aprecia que todo el ambiente está como sumergido en una neblina rojiza que dificulta la visibilidad en distancias mayores de 300 m. Cuando el viento

es tan fuerte, los remolinos de eje vertical son frecuentes, viéndoseles avanzar girando rápidamente en determinada dirección.

Estas masas de arenas en suspensión, en las que predominan, como se ha indicado, los elementos duros, son transportadas y lanzadas violentamente contra los obstáculos que a su paso se oponen, dejando en ellos sentir su acción de desgaste.

Pero aun suponiendo que la atmósfera esté libre de materiales en suspensión, no por eso deja de actuar sobre la superficie rocosa o térrea del suelo, determinando fenómenos de alteración al actuar la masa aérea en movimiento con su presión y con su frote. La velocidad es lo fundamental para tal acción, que es ciertamente de gran importancia, pues con vientos fuertes, presiones de 170 kg. por metro cuadrado de superficie no son raras, llegando incluso a originar empujes de 250-300 km. por metro cuadrado, durante tempestades de vientos muy violentas. El transporte simplemente de elementos finos es ya de por sí un fenómeno de gran importancia en estas zonas áridas.

Tan pronto el viento cesa en el desierto, la atmósfera se aclara, y durante los raros días de calma la visibilidad es perfecta hasta el más lejano horizonte.

Situación geológica

Geológicamente, la zona de los campamentos se encuentra en la Cuenca Paleozoica de Tindouf, que se desarrolló como una cuenca marginal cratónica en el Precámbrico terminal – Devónico, acumulando un espesor máximo de sedimentos, predominantemente detríticos, de unos 7 Km (Traut et al., 1991). La disposición estructural de la cuenca a gran escala viene dada por una estructura sinclinal asimétrica, cuyo flanco sur se encuentra prácticamente horizontal (Figura 3). Los episodios de sedimentación paleozoica terminaron al final del Carbonífero (Traut et al., 1991). Desde entonces, la Cuenca de Tindouf se encuentra en un estado principalmente erosivo, aunque existen pequeños registros de episodios sedimentarios post-paleozoicos. Estos sedimentos mesozoicos y terciarios están restringidos a la parte central de la cuenca, donde se sitúan los sondeos de explotación de agua de El Aaiún y de Rabouni. El campamento de Dajla se sitúa sobre las rocas paleozoicas del flanco sur del sinclinal de Tindouf.

Según los datos que se han podido recopilar, los espesores de la cobertera post paleozoica pueden alcanzar los 300 m (Ratshcillar, 1970-71), pero en general son menores a los 170 m (Traut et al., 1991). Según el Mapa Geológico de Marruecos a escala 1:1.000.000, los sedimentos mesozoicos son de edad Cretácico Medio, y consisten en una sucesión de conglomerados y areniscas intercalados con arcillas rojizas. Estos materiales cretácicos están cubiertos por sedimentos neógenos (continentales – lacustres) formados por conglomerados y areniscas con intercalaciones de calizas arenosas.

2.1.3. Consideraciones generales con respecto a las hamadas

Consideradas morfológica y geológicamente, las hamadas constituyen unidades notabilísimas en el dominio físico sahariano, tanto por lo singular de sus formas, que dan lugar a las inmensas mesetas y planicies de aspecto y dimensiones marinas, tan frecuentes en las extensiones del Gran Desierto, como por esta misma frecuencia y generalización que colocan dichas formas en primera línea dentro de la morfología del Sáhara.

Para la persona que las observa atravesándolas por sus comarcas centrales, las hamadas ausentes en su inmensidad del sentido relativo de la altura, se presentan como llanos monótonos, limitados, como en alta mar, por una línea sensiblemente circular que cierra el lejano horizonte rosado, caliginoso, donde se funden los tonos sepías, amarillos y calientes de la calcinada en inacabable llanada, con el cobalto lechoso del cielo.

Estas plataformas, superiormente se presentan constituidas por una potente cobertura caliza, a veces sílica, originada por la ascensión hasta la superficie de las aguas cargadas de carbonato cálcico o de sílice, depositándose estos materiales en las zonas más superiores. De esta manera se forma esta costra o capa protectora que preserva de la erosión a los materiales inferiores y que contribuye a aumentar la aridez característica de estas formaciones.

Las aguas de lluvia se infiltran a través de los materiales permeables y dan lugar a la formación de capas freáticas en el contacto con los estratos arcillosos más inferiores, constituyendo así una red más o menos intensa de aguas subterráneas, que vienen a sustituir a la casi por completo ausente de la superficie.

Pero, hemos de enfatizar nuevamente, que la verdadera característica de estas superficies es la ausencia de una red hidrográfica manifiesta.

Generalidades de las aguas subterráneas

Como sabemos, el Sáhara constituye un territorio desértico que ofrece características esteparias con acentuados rasgos de aridez. Por ello, las aguas superficiales son escasas, pues los ríos corren sólo accidentalmente, y rara vez. En estas tierras, pues, sus gentes, para beber, no han de confiar en las aguas caídas del cielo, que hacen, a veces, que los cauces corran; han de buscarlas, salvo muy raras ocasiones, en el subsuelo, y no siempre a escasa profundidad.

Características hidrogeológicas de las hamadas

Sin duda alguna, el país más pobre en aguas, tanto superficiales como profundas, es la hamada. Teniendo en cuenta la horizontalidad de sus formaciones y la permeabilidad, en particular, de los estratos calizos más superficiales, se comprende que no bien las aguas de las accidentales lluvias han caído en sus superficie, desaparecen por infiltrarse rápidamente en el terreno, al seguir las naturales fisuras y grietas que afectan al estrato superior calizo.

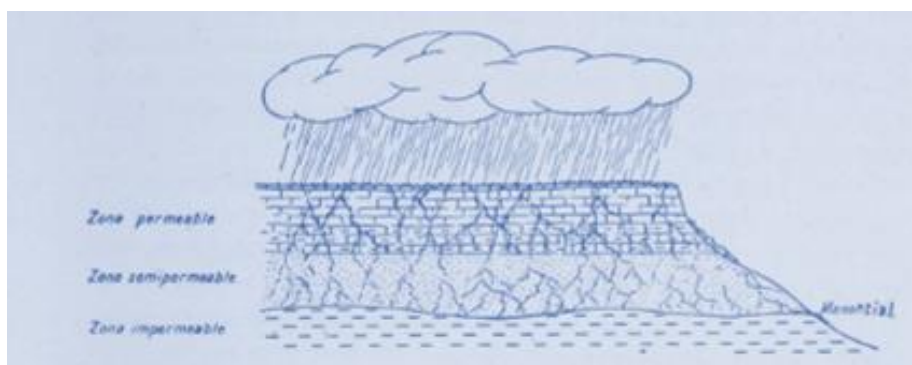


Figura 2.4: *Esquema de la circulación de las aguas subterráneas en las Hamadas*

Así pues, en estas zonas de hamada, durante los cortos pero intensos períodos de lluvias, las aguas no bien han alcanzado la superficie del terreno, desaparecen, infiltrándose en él, siguiendo las fisuras existentes en los niveles calizos superiores. Esta infiltración es difusa, pero muy rápida.

2.1.4. Viviendas saharauis

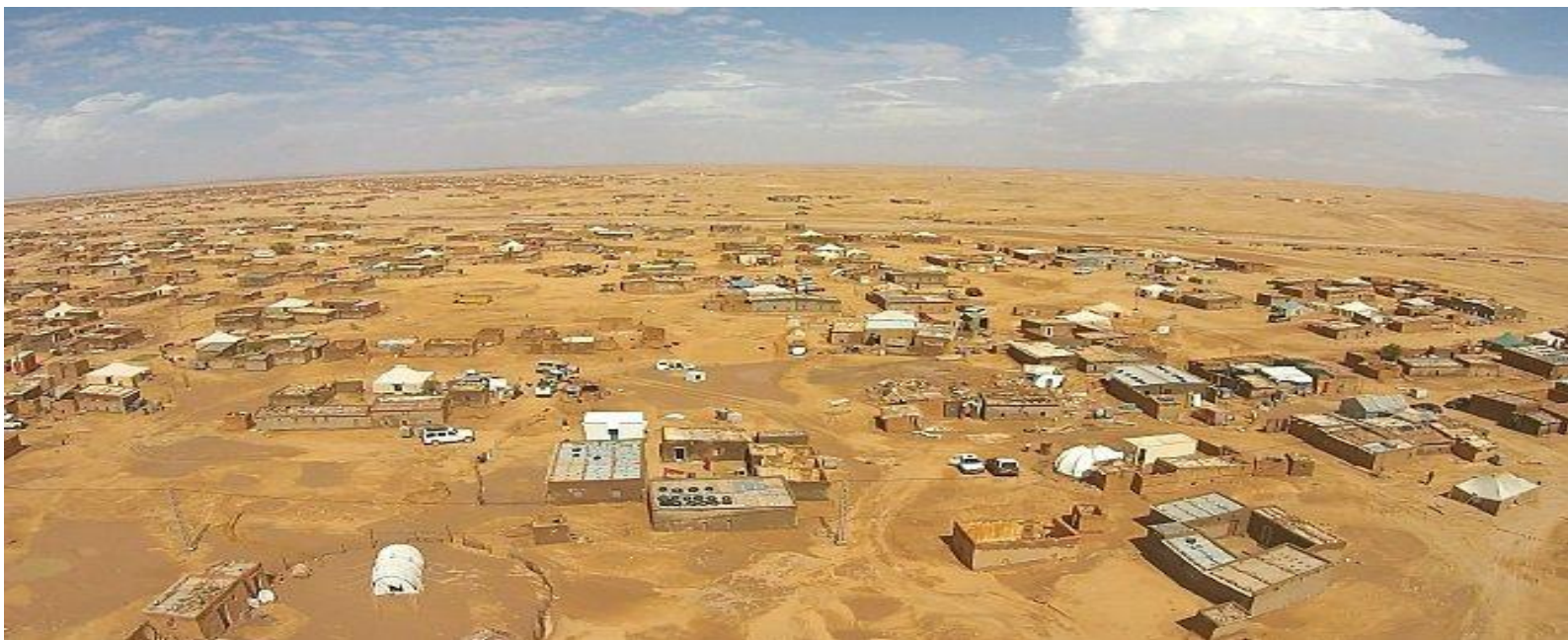


Figura 2.5: *Panorámica de los campamentos saharauis*

Los campamentos de refugiados saharauis están situados en el sur de Argelia, cerca de la ciudad de Tindouf y están divididos en varias provincias, alejadas entre sí, para una mayor protección frente a posibles ataques de Marruecos.

El entorno es muy inhóspito. Nada crece allí y la población saharauí estamos expuestos a frecuentes tormentas de arena. La temperatura es un severo problema, pues en verano puede sobrepasar los 50°C, siendo asimismo el resto del año un clima seco, con temperaturas extremas y mucho calor con el que convivir, en un medio árido y con escasez casi absoluta de agua.

Cuando mi pueblo llegó a estas tierras, refugiado tras la invasión marroquí, se instaló con la idea de la provisionalidad en sus mentes. Con una estancia que se ha visto forzada a prolongarse en el tiempo, los saharauis hemos desarrollado la construcción de nuestras viviendas.

Al principio, sólo había jaimas. Hoy en día la imagen de los campamentos es diferente. Casas de adobe por doquier, dan la impresión de un desarrollo urbanístico. Éste se ha dado gracias a la arena y el agua como recursos disponibles.

Cabría pensar que son campamentos permanentes dada su estructura urbanística, pero esta imagen puede cambiar rápidamente. Las lluvias torrenciales pueden hacer desaparecer en pocas horas el trabajo de años de construcción.

Pero no es sólo el medio y sus fenómenos climáticos quienes permanentemente ponen en evidencia el carácter transitorio de estos asentamientos, sino que somos la propia población quienes continuamos asegurando que se trata de una situación temporal de emergencia hasta que nuestra tierra nos sea devuelta. Este pensamiento -que se ha ido desarrollando y variando con el paso de los años y la evidente y forzosa prolongación de nuestra estancia en los campamentos -ha tenido una impronta fundamental en el desarrollo de las viviendas y diferentes barrios, así como en la vida y relaciones entre la población refugiada.

La jaima, vivienda por excelencia de los saharauis

En los comienzos no había casas de adobe, sólo jaimas.

Al principio los saharauis eran nómadas, vivían en el desierto en jaimas, es decir, tiendas beduinas compuestas por pelos de camello y de cabras cosidas manualmente entre ellas.

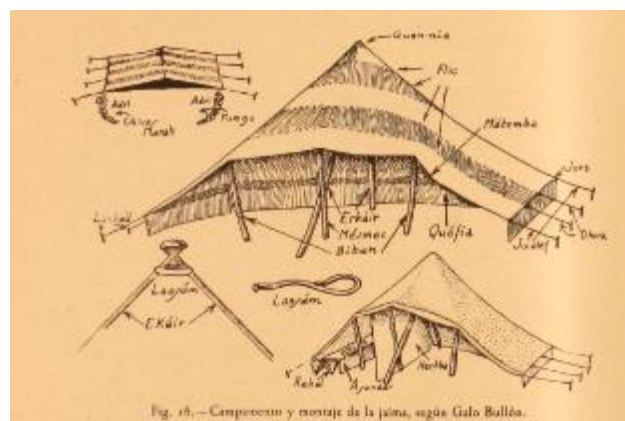


Figura 2.6: *La jaima tradicional*

La jaima beduina saharauí tenía una forma piramidal y estaban sostenidas en las extremidades y en el centro por palos de madera. Solían tener la puerta principal dirigida al sur y siempre adosada a esta puerta un pequeño cobijo, edificado con ramas de árboles secos.

Su longitud oscilaba entre 6 o 12 metros, dependiendo de si es una familia numerosa o no. Por dentro estaba dividida en dos partes: una destinada a las mujeres y otra a los hombres donde se solía recibir a los huéspedes.

La forma triangular de la jaima tiene la función de prevenir contra el viento árido del Sahara, del mismo modo que su composición impide la entrada de las raras pero intensas lluvias de invierno.

En la forma de vida nómada se hace fundamental el movimiento y desplazamiento en los alrededores para obtener pasto para sus animales; fuente de su supervivencia. Una jaima puede ser recogida y empacada rápidamente para continuar el camino, y ser instalada en el próximo emplazamiento, por eso ha sido la vivienda saharauí por excelencia, al adaptarse perfectamente a sus necesidades y su modo de vida.

Las jaimas se ordenaban en grupos compuestos por más de cuatro jaimas llamadas “frig”, porque no es común ver una sola jaima aislada en el Sahara. Como pueblo nómada solían establecer sus jaimas en un lugar donde hubiera pasto y cercano a un punto de agua.

Después de la evacuación del Sahara Occidental por el ejército español en noviembre 1975 y de la simultánea invasión por los ejércitos marroquí y mauritano, miles de saharauis tuvieron que huir de sus hogares para refugiarse en la hamada de Tinduf en Argelia.

Desde entonces nos hallamos los refugiados saharauis en este lugar. Auxiliados por la ayuda internacional, se instalaron unas jaimas de lona más fáciles de montar y transportar que eran donadas por organizaciones internacionales.

Aquí se hace la vida cuando el calor en el exterior es demasiado para permitir cualquier actividad. Siempre habrá té y, sobre todo, una alfombra que se extiende por todo el suelo y que te permite sentarte o acostarte en donde quieras, apoyado en una almohadilla. La forma y la temperatura de la jaima permiten que la conversación fluya entre todas las personas y que se pueda compartir la comida fácilmente. También existe un lugar para conversaciones más privadas, en una de las esquinas de la tienda.

La jaima es el lugar donde la familia se encuentra y permanece unida. Bebemos té, jugamos a juegos en ella, recibimos a nuestros vecinos o huéspedes y dormimos. Todo ocurre en la jaima. En nuestra cultura, la familia es lo más importante y la familia permanece unida con el vínculo de la jaima.

La jaima también es el lugar primordial del encuentro. Encuentro que se da entre los mayores y los jóvenes y también con las visitas. Para nosotros los saharauis, la cultura oral tiene una importancia vital. Es a través de la oralidad que conocemos nuestra historia, nuestra cultura, nuestra religión, nuestro entorno... Y es en la jaima donde se propician este tipo de intercambios.

Como la calle es muy caliente durante el día, la jaima es donde ocurre la mayor parte de la vida en común de la gente del Sahara. La luz proviene de la entrada, una abertura en la tienda que también permite la circulación del aire. El sol nunca falta en el desierto, pero si quieres aún más luz puedes abrir alguna de las ventanas.

También en el exilio era la jaima donde se preparaba la comida y se alimentaba la gente; pero esto ocasionaba problemas de recalentamiento del interior y frecuentes incendios de diferente importancia. Para solucionar este problema se edificó por primera

vez una habitación de adobe y cubierta de planchas de zinc autoconstruida, anexa a la jaima que permitía así evitar incendios.



Figura 2.7: *Jaima de pelo de camello*

Posteriormente se creó una dependencia del baño y letrina, con una pequeña fosa séptica, y a continuación un salón dormitorio y comedor más grande, (normalmente seis por ocho metros) donde la familia desarrolla casi toda la vida.

En esta evolución se siguen construyendo más cuartos, con un muro envuelve todas las estancias. Sin embargo, la actual proliferación de muros de adobe no concluye con una demolición de la jaima, pues siguen siendo fundamentales sobre todo ante las inclemencias del tiempo, y las inundaciones que han derruido muchas casas de adobe y por eso las familias han reinstalado jaimas para cuando llueve desesperadamente o hay fuertes vientos en el desierto.

La jaima es un claro símbolo de residencia temporal. Muestra claramente la intención de estancia provisional, al ser fácilmente desmontables para regresar de vuelta a casa, a nuestro país. Siguen existiendo en los campamentos porque los saharauis queremos dejar claro que nuestra vida de refugiados no es ni será permanente. Prácticamente cada familia tiene aún una jaima integrada en sus complejos de viviendas, y se les da mucho uso. Pero incluso cuando no las utilizan más, suelen dejarlas instaladas como símbolo de reivindicación política.

La frecuencia del uso de la jaima depende de los hábitos de los más ancianos de la familia. Si vivían en jaimas en el Sáhara Occidental cuando era provincia española, suelen seguir prefiriendo vivir en la jaima. Si los padres viven en las jaimas, también lo suelen hacer así sus hijos e hijas. También hay mayores que ya vivían en casas en el Sáhara español y prefieren vivir en casas ahora, aunque la mayoría todavía tienen jaimas.

De cualquier forma necesitamos las jaimas cuando vienen las fuertes tormentas de lluvia o arena que amenazan con destruir nuestras casas de adobe y son además símbolo de nuestra historia y cultura nómadas. Muestra de dónde venimos y cuáles son nuestras tradiciones.





Evolución de la vivienda en los campamentos

Los campamentos de refugiados nacieron de una emergencia. Los saharauis tuvieron que huir de su tierra, de su país. No pudieron llevar nada consigo. Al comienzo de la organización de los campamentos de refugiados, Argelia les proporcionó jaimas prefabricadas.

A medida que fue pasando el tiempo, se fueron desarrollando nuevos tipos de vivienda. Veamos en este esquema fotográfico las variantes existentes:



Figura 2.8: *Tipos de vivienda*

<p>Jaima tradicional</p> <p>Jaimas construidas a partir de pelos de camello y cabra</p>		<p>Casa de adobe</p> <p>Tras el cese al fuego, fueron construidas más casas de adobe</p>
<p>Jaima argelina</p> <p>Jaimas construidas a partir de pelos de camello y cabra</p>		<p>Casa de ladrillos de cemento</p> <p>Tras el cese al fuego, fueron construidas más casas de adobe</p>
<p>Jaima de ACNUR</p> <p>Más tarde también ACNUR dona jaimas a los refugiados</p>		<p>Casa de chapa</p> <p>Es resistente al agua y más barata que la de cemento. El calor en verano, lo que limita su uso en verano</p>
<p>Casa de adobe con tela</p> <p>Cuando comenzaron a construir con adobe cubrían las casas con telas</p>		<p>Casa con cobertura de cemento</p> <p>Realizada con ladrillos de adobe más frescos para el verano y cubierta de cemento</p>

Cuadro 2.5: *Tipos de viviendas*

Jaimas

En los campamentos existen diferentes tipos de jaimas. Las que terminan en pico simulan las antiguas bereberes. Las que tienen techo a dos aguas fueron donadas por Argelia. Como llevan mucho tiempo en los campamentos, la mayoría está reparada. La Jaima con el rectángulo arriba son las más comunes y fueron donadas por ACNUR. La jaima con los laterales plegables es utilizada para las bodas o eventos en que acude mucha gente. Permite mayor concurrencia.



Figura 2.9: *Tipos de jaimas*

Casas de adobe

Son en la actualidad las viviendas más comunes en los campamentos. Como los ladrillos están hechos con arena y agua, pueden ser fabricados por cualquiera o adquiridos por precios asequibles.

Asimismo tiene ventajas térmicas y de habitabilidad; pues ha permitido tener la cocina y el baño aislados; así como habitaciones para diferentes usos.



Figura 2.10: *Casa de adobe*

Casas enfoscadas con cemento

Las casas de cementos son un fenómeno relativamente reciente. Los ladrillos no pueden ser fabricados por ellos mismos, los compran en Tindouf. Son muy caros y sólo algunos privilegiados pueden permitírselos. La gran ventaja de las casas de cemento es que no son destruidas por la lluvia. Sin embargo se calientan con más facilidad que las de adobe y son más caras.

Otra fórmula mixta es recubrir de cemento los ladrillos de adobe, con la idea de hacerlos más impermeables frente a la lluvia. De este modo son más económicas y asequibles.



Figura 2.11: *Casas enfoscadas con cemento*

2.2. Marco práctico

2.2.1. Casa tipo

En una vivienda saharauí en los campamentos, en familia...



Figura 2.12: *Casa tipo*

Conjunto de viviendas tipo...



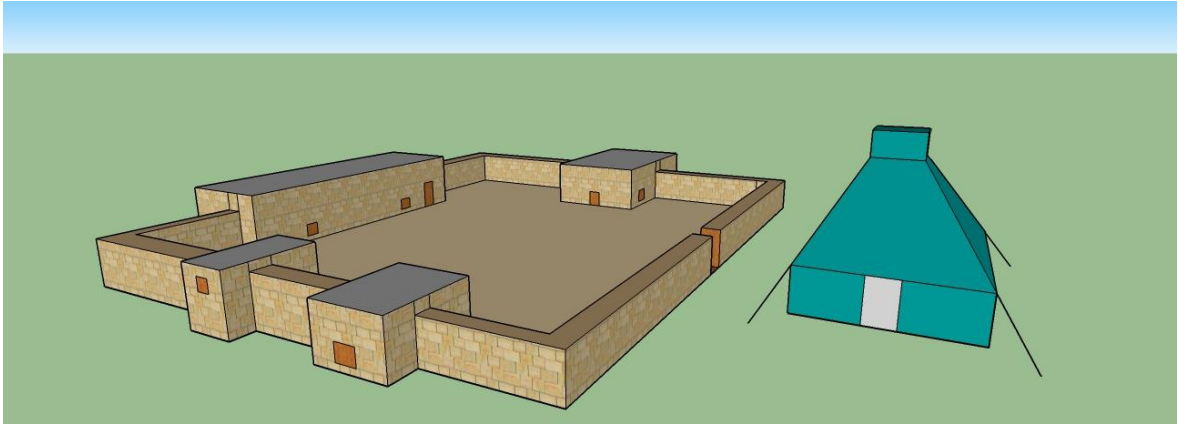


Figura 2.13: *Conjunto de viviendas*

En el barrio 4 de la daira de Miyec

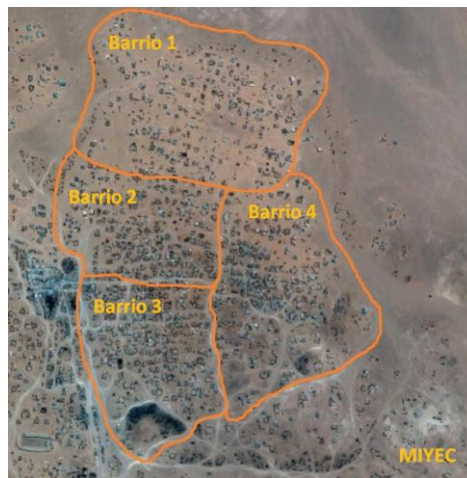


Figura 2.14: *Barrios*

En la wilaya de Auserd



Figura 2.15: Auserd

En los campamentos de refugiados saharauis en Tindouf, Argelia.



Figura 2.15: Tinduf

2.2.2. Objetivos

Con mis 25 años viviendo en estos campamentos y a raíz de mis estudios universitarios en electroenergética y de máster sobre eficiencia energética, mis inquietudes se han centrado en buscar soluciones:

- Para mejorar el confort térmico de las viviendas
- Desarrollar mayor eficiencia energética en las mismas
- Disminuir los costes económicos a largo plazo

Para que nuestra vida en los campamentos además de digna, pueda ser más cómoda y más sencilla, me he propuesto optimizar los recursos del medio creando mejores condiciones de vida y comodidad.

2.2.3. Proceso constructivo

Por eso, la temporalización del proyecto prevé una serie de pasos:

1. Desarrollo de una investigación energética de viviendas posibles adaptadas al entorno.
2. Proponer cambios concretos en las viviendas y adaptados a las características ideosincráticas y económicas de la población, para mejorar el confort térmico (TFM)
3. Comenzar con la prueba de una maqueta de adobe de tamaño aproximado de 1,5 x 1,5 x 2m
4. Implementar las medidas de mejora en mi propia casa, con la construcción de una nueva casa de adobe modificada y eficiente.
5. Desarrollar reuniones para informar y convencer de las garantías de confort térmico de las nuevas viviendas con las mujeres de los diferentes barrios; pues son ellas las que desarrollaron el modelo actual y han organizado históricamente la construcción y diseño de las mismas.
6. Difundir del barrio, a la wilaya y a todos los campamentos esta nueva propuesta de vivienda, para hacer desaparecer, en la medida de las posibilidades, las incomodidades causadas por el calentamiento de las viviendas.

3. Diagnóstico energético del edificio de vivienda tipo

3.1. Materiales de construcción y sus características

Los materiales que se utilizan para la construcción de viviendas de adobe en los campamentos saharauis de Tinduf son el adobe, las piedras, el agua y la chapa de zinc. Están construidas prácticamente con los únicos materiales existentes en esta zona y sus cualidades varían dependo de su ubicación concreta.



Figura 3.1: Adobe, el material más asequible

Para la construcción de viviendas, el material que se utiliza es el más próximo a la construcción, ya que existen problemas de transporte. En los últimos tiempos se están usando materiales adquiridos en Tindouf (Argelia): block prefabricado de hormigón, piezas rectilíneas de madera, chapa de zinc plana (ondulada y quebrada), cemento, acero, piezas cerámicas, paja... En general son de baja calidad, debido a su coste.

3.1.1. El adobe

El adobe es un material de construcción hecho con arena, arcilla y agua, y, a veces con fibra o material orgánico como paja, ramas o estiércol. Es moldeado en forma de ladrillo y se deja secar al sol. Es conocido por ser un material antiguo capaz de hacer estructuras muy duraderas. Hasta el día de hoy se han preservado construcciones realizadas con ese material, que se encuentran entre las más antiguas del planeta. A veces se hace

distinción entre los adobes pequeños, del tamaño de un ladrillo común, y los grandes adobones que pueden llegar a medir 2 metros de largo es un material rápido de fabricar y sencillo.

ADOBE	
Conductividad térmica λ (W/m·K)	0.82
Resistencia térmica $R = e/\lambda$	0.30
Absortividad específica	0.65
Reflectividad	0.35
Emisividad	0.97
Densidad ρ (kg/m ³)	1650
Transmitancia térmica U (W/m ² ·K)	3.33
Calor específico Cp J/Kg ·K	1100

Figura 3.1: *Propiedades térmicas del adobe*

Como podemos observar en la tabla, el adobe tiene valores muy altos en cuanto a las características que le definen como aislante del calor. Observemos que su emisividad, resistencia, absortividad y emisividad tienen valores elevados que permiten que no penetre el calor con facilidad a la vivienda, y el que sí lo haga sea en gran medida absorbido. Asimismo vemos reflejado en su calor específico un valor elevado que hace dificultosa la tarea de calentar este material.

También observamos que los valores que hacen referencia a transmitir el calor, dejarlo pasar al interior de la vivienda son muy bajos: con una conductividad de 0,82 W/m·K, una reflectividad de 0,35 y una transmitancia muy baja de 3,33 W/m²·K

Por tanto, un edificio hecho de adobe regula la temperatura interna permitiendo que en verano se conserve el frescor y en invierno, el calor. Otra ventaja, es que es un material muy fácil de utilizar.

3.1.2. La chapa de zinc

El color natural del zinc es un plateado metálico claro. Algunas de las características que hacen que se utilice con frecuencia para revestir fachadas son:

- Buena resistencia a la corrosión y una buena durabilidad estimada de 50 años.
- No requiere mantenimiento alguno o limpieza
- Es muy maleable
- Reciclable 100% sin límites de ciclos, no es tóxico.
- Se suelda bien y es compatible con otros metales habitualmente empleados en la construcción.



Figura 3.2: *Chapa de zinc*

CHAPA DE ZINC	
Conductividad térmica λ (W/m·K)	110
Resistencia térmica $R = e/\lambda$	0.000009
Absortividad específica	0.55
Reflectividad	0.45
Emisividad	0.055
Densidad ρ (kg/m ³)	7200
Transmitancia térmica U (W/m ² ·K)	111111.11
Calor específico Cp J/Kg ·K	380

Cuadro 3.2: *Chapa de zinc*

Como podemos observar en esta tabla (y por el contrario de lo que ocurría con el adobe) el zinc tiene valores muy bajos en cuanto a las características que le definen como aislante del calor (emisividad, resistencia térmica, absorptividad, emisividad y ce); y muy altos los valores que hacen referencia a transmitir el calor y dejarlo pasar al interior de la vivienda (conductividad, reflectividad, densidad y transmitancia)

3.2. Análisis energético del edificio de vivienda tipo

Las primeras casas de ladrillo que se construyeron en los campamentos de refugiados eran de adobe. Estas casas siguen siendo los más comunes. Como los ladrillos están hechos de arena y agua, son fácilmente accesibles para la población o pueden comprarse por poco dinero; además de eso, este material es un buen aislante térmico.

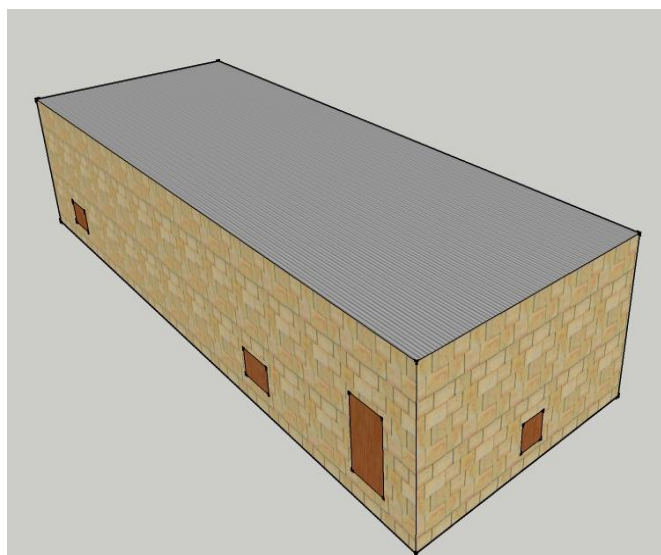


Figura 3.3: *Vivienda tipo*

Sin embargo, cuando hacemos un análisis más pormenorizado de las características térmicas generales, podemos observar la existencia de varios elementos que dificultan el confort térmico en su interior.

En primer lugar, observemos las características físicas de los materiales con los que se construye la vivienda. Con los datos observables en la tabla 3.2. se hace visible que el adobe es un material muy apropiado para estas viviendas -(dadas su baja conductividad y transmitancia térmica y su elevada resistencia térmica, así como un calor específico alto) por revertir en un importante aislamiento térmico del exterior, y una baja densidad que permite que por su porosidad se regule la humedad en el ambiente.

	<i>Casa de adobe</i>	
	Paredes: Adobe	Techo: chapa de zinc
Área (m ²)	90	28
Espesor e (m)	0.25	0.001
Conductividad térmica λ (W/m·K)	0.82	110
Resistencia térmica $R = e/\lambda$	0.30	0.000009
Absortividad específica	0.65	0.55
Reflectividad	0.35	0.45
Emisividad	0.97	0.055
Densidad ρ (kg/m ³)	1650	7200
Transmitancia térmica U (W/m ² ·K)	3.33	111111.11
Calor específico Cp J/Kg ·K	1100	380

Cuadro 3.2: *Propiedades térmicas de la vivienda tipo*

La chapa de zinc, sin embargo, posee valores muy altos de conductividad térmica y transmitancia térmica. Asimismo, un calor específico bajo y una resistencia térmica bajísima. Esto produce que el calor que recibe diariamente en el desierto, dada su baja resistencia térmica, se transmita al interior de la vivienda por conductividad y transmitancia térmica, lo que produce altas temperaturas en el interior, y malestar en la salud, tales como dolores de cabeza, variaciones en la tensión arterial, etc.

En segundo lugar, si analizamos la ventilación de las casas, podemos observar que éstas poseen en su mayoría una puerta y ventanas situadas a unos 30 cm del suelo. Esto es debido a que culturalmente los saharauis hacemos mucha vida a ras del suelo, en las alfombras; y la ventilación y visión la adecúan a su estilo de vida. Sin embargo, la ausencia

de otras aberturas en la zona alta de la vivienda dificulta la circulación del aire por convección.

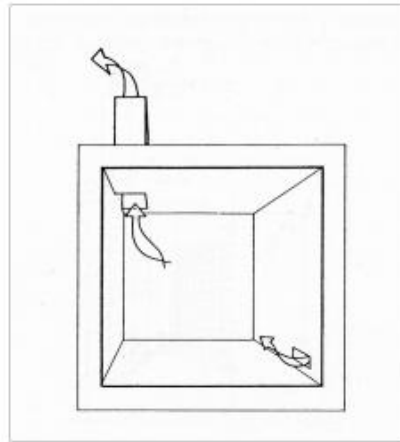


Figura 3.4: *Esquema de ventilación*

Si al estancamiento del aire añadimos que éste es muy caliente debido a las condiciones térmicas del techo de zinc con su elevadísima transmitancia térmica, tenemos un interior con un confort térmico muy bajo, con temperaturas muy extremas.

En tercer lugar, si analizamos el entorno y recordamos el medio que rodea a las viviendas (que detallamos anteriormente) podemos observar que la desertización, la sequedad del ambiente y la intensa radiación solar, hacen que la arena y tierra que rodean a las viviendas irradien fuertemente las casas, al no tener ningún elemento que impida la radiación solar directa a sus muros, ni la indirecta reflejada por el suelo y el calor del aire circundante.

3.3. La transferencia de calor

Analicemos ahora más detalladamente cómo se produce el proceso de transferencia de calor en el caso de estas viviendas.

Comencemos por las paredes, que en este caso estarían conformadas por ladrillos con las siguientes medidas: 60x30x15 cm.

Veamos, tenemos en este gráfico el Sol cuya radiación solar global representamos mediante la G . Como podemos apreciar ésta incide en las paredes y una parte es absorbida αG y otra es reflejada ρG .

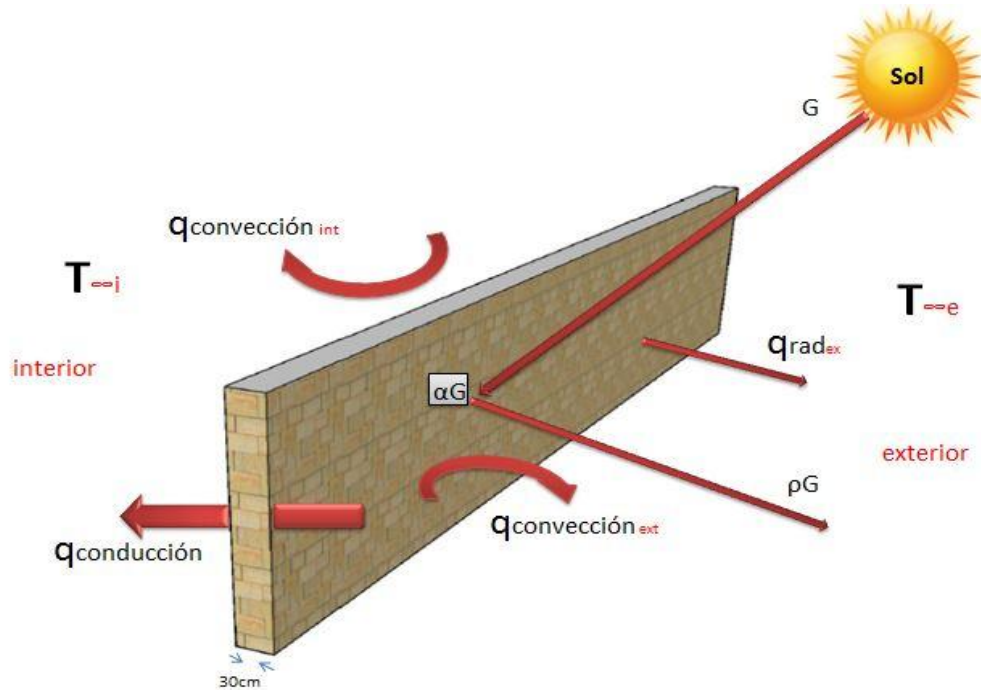


Figura 3.5: *Transferencia de calor en paredes*

Además de estos parámetros, vemos representados los distintos flujos de calor por conducción hacia el interior de la vivienda, por convección tanto en el interior como en el exterior y por radiación, que es reflejado por el muro. De este modo se dan las variaciones en las temperaturas interna y externa a lo largo del día.

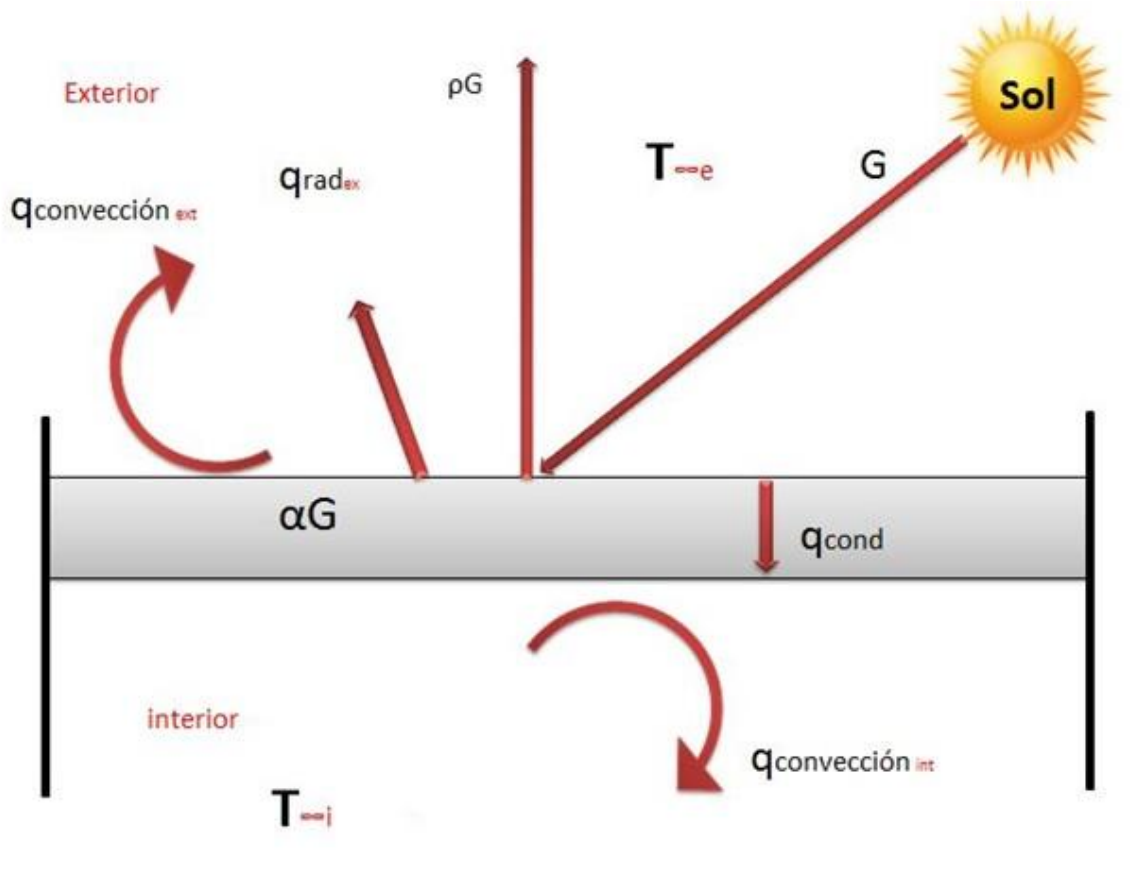


Figura 3. 6: Transferencia de calor en el techo

Del mismo modo, vemos representados en la figura 3.7. los valores de la transferencia de calor en este segundo esquema, pero en este caso, el material es diferente: se trata de la chapa de zinc. Aunque los procesos de flujo de calor son los mismos, los valores que adquieren cada uno de ellos, varían en este caso en relación a las características del zinc que son diferentes.

Para este material, la radiación absorbida será mayor, dado que posee una resistencia térmica muy baja. Y los valores de los flujos de calor serán más elevados en el calor de conducción y en los flujos de calor por convección interna dado que la conductividad es más de 100 veces mayor que la del adobe y la transmitancia es más de 30.000 veces mayor que la del adobe.

Por tanto, se hace evidente que las diferencias de temperatura entre el exterior y el interior tienden a igualarse bajo los efectos de la chapa de zinc; perdiéndose en gran parte las características aislantes del calor que posee el adobe en estas viviendas.

4. Propuestas de medidas de mejora de la eficiencia energética y del bienestar térmico

Ante la situación que hemos descrito, de bajo confort térmico, que es el día a día en mi vida y en la de los saharauis en los campamentos, quiero proponer varias medidas de mejora que permitan alcanzar cotas de bienestar térmico notablemente más altas, una reducción del consumo energético de las viviendas en ventiladores y demás sistemas de refrigeración, y desarrollar una mayor eficiencia energética.

Para ello voy a exponer tres propuestas de mejora. Y lo voy a hacer escalonadamente, de forma que nos permita analizar las aportaciones que cada uno de los cambios desarrollará en el acabado final. Estas propuestas las denominaré soluciones 1, 2 y 3.

Además, cada una de las nuevas soluciones, contiene en sí las anteriores, acumulativamente.

Cada una de las soluciones atiende a mejoras en ámbitos diferenciados. En el primer caso a la **estructura** de la vivienda, en el segundo a mejoras de refrigeración y temperatura del **interior** de la vivienda y en el tercero a factores del **exterior** de la vivienda.

Quiero añadir, que en la S1 nos detendremos y profundizaremos más detalladamente, porque es la propuesta de cambio más fundamental de la investigación y explicaré pormenorizadamente en qué consiste.

Comencemos por la solución 1.

4.1. Solución 1

Como primera solución, hemos construido una vivienda que resiste más el calor, en la que las paredes son más anchas, pues su espesor pasa de 30 a 60 cm eso significa que el muro duplica su resistencia térmica. Esto reduce la velocidad del flujo de calor al interior de la vivienda.

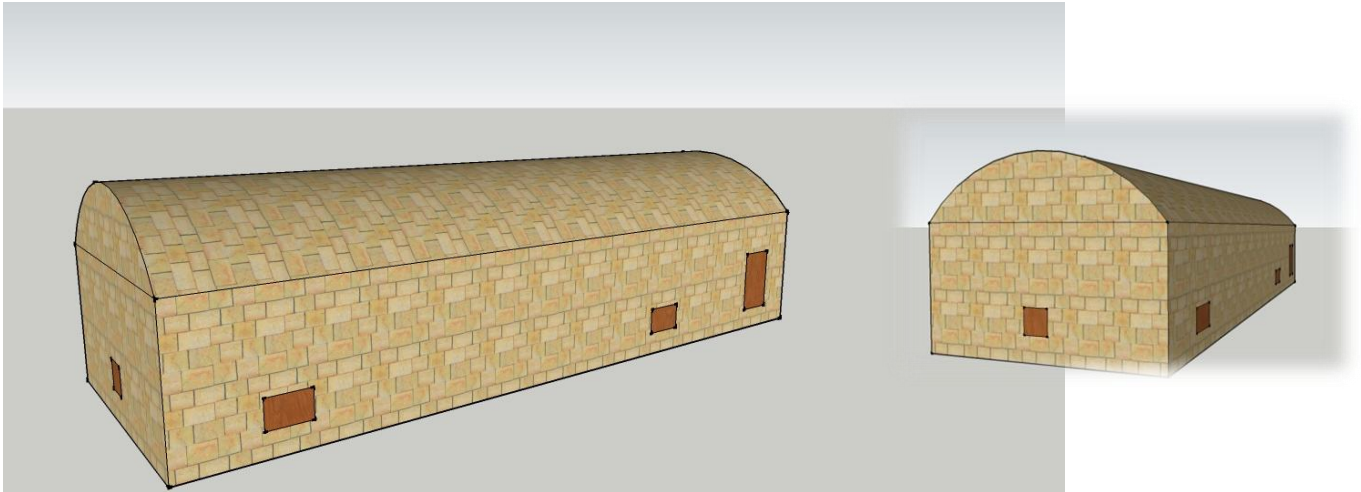


Figura 4.1: *Solución 1*

En el caso del techo hemos sustituido la chapa de zinc por el adobe, en forma bóveda nubiana. Ésta permite por su forma que la incidencia de los rayos solares se reduzca

Es bien sabido y está comprobado que el ángulo de los rayos solares en techos en forma de bóveda hace que éstos no estén expuestos completamente, pues prácticamente todo el día hay una parte sombreada de la misma; lo que reduce el estrés térmico en el techo.

Esa bóveda también ayuda a generar una zona de alta presión en el lugar expuesto al sol, y una zona de baja presión en el sombreado del techo, lo que ayuda a colocar el movimiento del aire entre las dos regiones ayudando a mitigar la sobrecarga térmica en el techo. Es una técnica muy inteligente y sabia y que puede ser aprendida y aprehendida por constructores profesionales y también por autoconstructores. No requiere ningún tipo de cimbra o soporte alguno mientras se construye, es mucho más eficiente, se utiliza solamente el adobe, y en términos de seguridad, al contrario de las superficies de la chapa metálica no corre riesgos de caerse con las tormentas de arena ni pueden ser robadas.

4.1.1. Dificultad de elaboración

En esta solución, lo más complejo es construir la bóveda nubiana, que necesita de personal con experiencia de construcción. Sin embargo hay muchos documentos que explican detalladamente cómo seguir paso a paso y de forma intuitiva su construcción. En mi caso, he pensado que antes de aplicar esta construcción, hacer primero una maqueta de unas dimensiones más manipulables (alrededor de 1.5 x 1.5 x 1m)

4.1.2. Obtención de materiales

El material que hemos utilizado aquí es el adobe y como sabemos, el adobe está disponible en los campamentos y eso facilita más esta forma de construcción y aplicarla que la plancha de zinc, que habría que traerla de Tinduf, una ciudad a unos 35km. y los gastos que esto supone.

Este cambio, es el más importante de los cambios que propongo y por tanto quiero profundizar más en él, explicando sus características, para una mejor comprensión de las importantes mejoras que provoca.

Profundicemos, ahora en la bóveda nubiana, por ser el cambio más importante que planteamos en esta investigación para la consecución de mejoras en la eficiencia energética de las viviendas.

La bóveda nubiana

Orígenes de la técnica

La bóveda nubiana es una técnica ancestral originaria de Nubia, región del sur de Egipto, de donde toma el nombre esta técnica que consiste en utilizar tierra como lo hacían los egipcios en torno al año 1300 a.C. bajo el reinado de Ramsés II.

La técnica nubiana fue retomada y desarrollada por el arquitecto egipcio Hassan Fathy, que hizo renacer las construcciones en arcos, bóvedas y domos. De hecho, desde los años 1930, Hassan Fathy se interesa por las tradiciones indígenas de su país, destacando la autenticidad cultural del mundo rural.

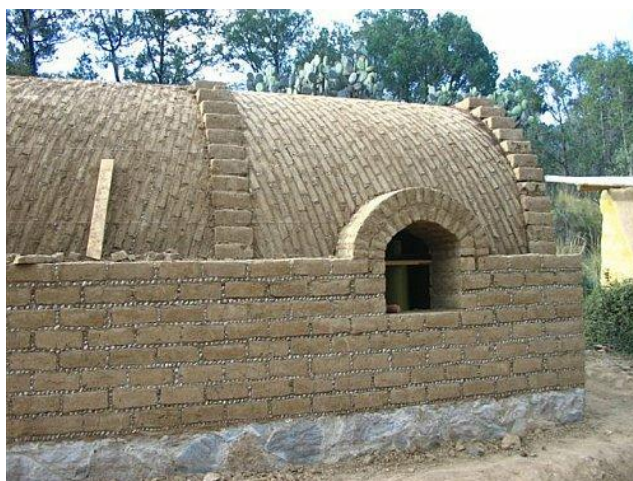


Figura 4.2: *Bóveda nubiana*

Consideraba poco adaptados los modelos de occidente en los países en desarrollo y es por esto que desde sus comienzos él defendió el principio de autoconstrucción con la participación activa de las poblaciones en la construcción de sus pueblos.

En 1941, él descubre la técnica de los albañiles nubios, que permite montar bóvedas y cúpulas sin encofrado¹. Esta técnica será modernizada y aplicada en todas las obras arquitectónicas de Hassan Fathy.

En 1942, pone en práctica sus ideas construyendo la casa de Hamed Saïd cerca de El Cairo. A partir de 1946, realiza múltiples construcciones (mezquita, teatro, casas...) utilizando el ladrillo de adobe. Construye entre otros, un pueblo en el delta del Nilo, dos colegios, una casa... y todo esto con adobe.

¹Molde formado con tableros o chapas de metal o de material análogo, en el que se vacía el hormigón hasta que se fragua, y que se desmonta después

La estructura

Las bóvedas nubianas se construyen sobre la base de muros de carga estructurales sometidas a ciertas fuerzas. Para confeccionar la bóveda, es necesario apoyarse sobre muros de carga con una distancia inferior o igual a 3,25m. Estos muros de carga deben tener una altura situada entre 1,10m y 1,70m.

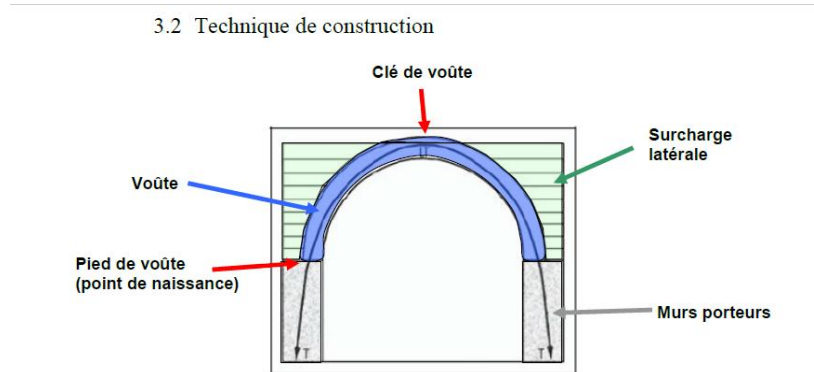


Figura 4.3: Estructura bóveda nubiana

Utilización de materiales simples

Los únicos materiales que se necesitan para construir una bóveda nubiana son: piedras para los cimientos, tierra (adobe) y agua para formar los ladrillos de adobe y el mortero. Los ladrillos son ladrillos comunes que pueden ser fabricados in situ por la gente del lugar, no requiere de ninguna destreza especial.

BUILDING A NUBIAN VAULT

Materials required to build a standard 8m long Nubian Vault (24m²):

84 carts of earth	_____	
Rocks for foundations	_____	
2,000 wall bricks	_____	
1,000 roof bricks	_____	
1 roll of local plastic sheeting	_____	
77 barrels of water	_____	

Figura 4.4: Materiales para la construcción

Como podemos observar en la figura 4.4., para construir una bóveda nubiana de 24 m², necesitamos alrededor de:

- 84 carretillas de tierra
- Rocas para los cimientos
- 2.000 ladrillos para las paredes
- 1.000 ladrillos para el techo
- 1 rollo de plástico largo
- 77 barriles de agua

Con herramientas básicas

No son necesarias maderas ni encofradas para construir la bóveda, sólo una serie de herramientas básicas como palas, picos, paletas, carretilla, nivelador... son necesarias, haciéndola por tanto, una tarea accesible para cualquier albañil.



Figura 4.5: *Herramientas básicas*

Una técnica asequible y con garantías

Desde el 2.000, la técnica de la Bóveda Nubiana ha probado ser una válida, ecológica y asequible opción, comparada con sus alternativas y que presenta numerosas ventajas, convirtiéndola en la técnica más asequible y adecuada para la construcción en África.

Costes

¿Cuánto puede costar una casa con bóveda nubiana?

Dependiendo de la variación de los siguientes elementos, los costos cambian:

- Los costos del trabajo: dependiendo del país donde se vaya a construir, el salario promedio de un albañil puede variar mucho.
- Los costes de los materiales: en ciertos lugares, especialmente los urbanos, los materiales (rocas, tierra, agua...) son más caros, porque han de ser transportados.
- La participación de los clientes: si la familia participa en la construcción, esto reduce los costes de la casa.

En el caso específico de los campamentos los costes de los materiales son aproximadamente estos:

- 100 ladrillos de adobe: 13 €
- 1 bosa de 30kg Cal: 12 €

Etapas de la construcción

1. Elegir un lugar

Es fundamental elegir un lugar que no sea peligroso en las inundaciones de las estaciones de lluvias. Es también recomendable, sobre todo en poblaciones con espacio limitado, planear la extensión de la casa en un futuro, dadas las facilidades de adosar habitaciones con esta técnica.

2. Preparar los ladrillos

Los ladrillos de adobe deben estar listos para la construcción; tanto los que formarán parte de los muros de carga, como los de la bóveda nubiana. En nuestro caso, estudiamos sus medidas y elegimos las siguientes:



Figura 4.6: *Preparar los ladrillos*

Para los ladrillos de los muros las medidas son 15 x 30 x 60cm y para aquellos que forman el techo, las medidas son más pequeñas resultando un ladrillo más fino y apropiado para esta construcción que no sigue líneas rectas. Serían ladrillos de 5 x 10 x 20, guardando la misma proporción.

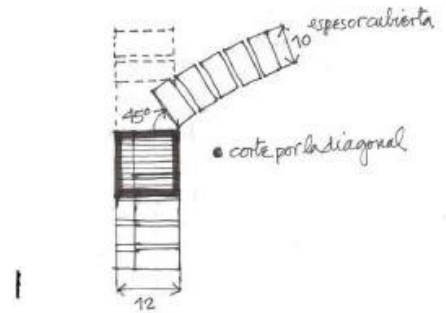
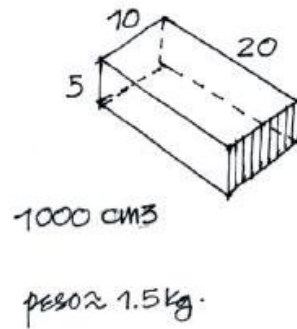
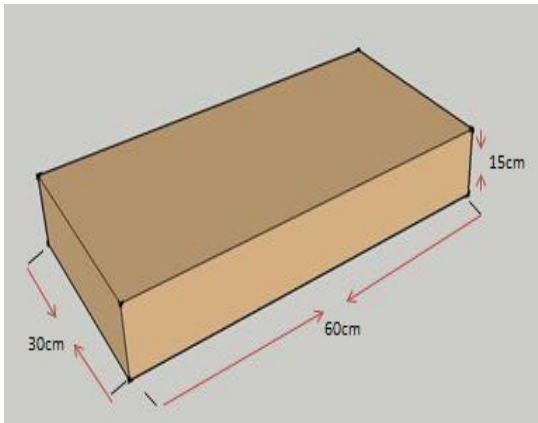


Figura 4.7: Ladrillo muro (izq.) y Figura 4.8: Ladrillo bóveda (dcha)

3. Cavar los cimientos

Los cimientos pueden variar desde los 40 a los 80 cm de profundidad; necesitan tener 70 cm de grosor. Deben rellenarse con rocas fijadas por un mortero de tierra. En nuestra propuesta los cimientos los enterraremos 50 cm bajo tierra y hasta que sobresalgan 30 cm sobre la tierra para evitar su descomposición con las lluvias torrenciales.



Figura 4.9: Cimientos

4. Preparar los ladrillos

Los muros maestros se hacen de ladrillos de adobe de dimensiones ligeramente variables según el lugar. Son los elementos más espesos de la construcción, con unos 60 cm de espesor.

5. El frontón

El frontón se construye con ladrillos colocados a lo largo y con un grosor de unos 40 cm. Son colocados, ligeramente inclinados hacia el interior de la construcción (aproximadamente 1cm por metro)



Figura 4.10: *Frontón*

6. Puertas y ventanas

Las aberturas deben hacerse antes de construir la bóveda.

7. La bóveda

Comienzo de la bóveda apoyándola contra el frontón.



Figura 4.11: *Bóveda*

8. El acabado

Se coloca en el tejado láminas de plástico para reducir la penetración del agua y su erosión. También se instalan canaletas para drenar la lluvia.



Figura 4.12: *Acabado con canaletas*

Ventajas

Técnica flexible

Cada bóveda nubiana es realizada en función de las necesidades y se adapta por tanto a una forma y volúmenes propios de los usos previstos para el edificio. Una bóveda puede adosarse a una antigua o una segunda planta. La modularidad es una ventaja importante que permite a las familias que crecen, disfrutar de más espacio. Es fácil reorganizar los interiores (por ejemplo añadiendo o quitando tabiques internos, abriendo o cerrando entradas, ventanas o arcos) El techo puede ser utilizado como terraza o de superficie de secado.

Aislamiento del calor y regulación térmica

Las paredes minerales gruesas juegan un papel muy importante en la inercia térmica de un edificio.

Esta inercia es la que permite conservar el fresco de las noches entre las paredes durante el día e, inversamente, de restituir, por la noche, el calor almacenado por los muros durante el día. Cuanto más gruesa es la estructura, más fuerte es la inercia térmica, por lo que mayor insensibilidad tendrán los espacios interiores a las oscilaciones de la temperatura exterior.

Asimismo, la porosidad natural permite regular el grado de humedad en el ambiente. Estos argumentos de bienestar son muy populares en la transmisión de los clientes con el entorno.

Ecológica y sostenible

Una casa de bóveda nubiana sólo usa materiales brutos disponibles en el entorno: sin planchas metálicas, cemento, acero, ni vigas. Con una huella de carbono muy baja, así como la ventaja de que ninguno de sus materiales necesiten ser manufacturados o transportados largas distancias, ni ningún árbol talado para su fabricación.

-Sin madera: 1 bóveda nubiana salva 4 árboles

- 1 bóveda nubiana ahorra 2 toneladas de CO₂

Asequible

Las casas construidas con la técnica de la bóveda nubiana pueden costar la mitad del precio que aquellas construidas con ladrillos u hormigón y tejados de plancha metálica, haciéndola asequibles para familias con pequeños presupuesto.

Duradera

Una casa con bóveda nubiana adecuadamente mantenida puede durar 50 años o más, en comparación con el promedio de 10 años de vida de las paredes de bloques de hormigón y techos de plancha metálica.

Sólida e ignífuga

Los muros gruesos y los tejados resistentes proporcionan solidez y casas ignífugas muy eficientes en comparación a las tradicionales con techo de paja, que pueden quemarse fácilmente.

Preserva la cultura y estética locales

Infinitamente más atractiva que las casas de techo metálico, incorpora prácticas tradicionales y estética de arquitectura de tierra, como la arquitectura de tierra de la terraza de un edificio.

Encantos diversos

La decoración, el espacio, la luz, las cualidades acústicas... son todas ventajas que facilitan el confort.

Seguridad

Al contrario de los techos con chapa metálica, ni el viento ni los ladrones pueden llevarse el techo.

Cuida la cultura local y estética

El programa “Nubian Vault” está basado en el rápido entrenamiento de los aprendices y en el uso de materias primas locales. Estos, crean trabajo y estimulan mercados y economías locales.

Crea trabajo y economías locales

Varios programas de bóveda nubiana se basan en el rápido entrenamiento de aprendices y en el uso de materiales locales. Éstos crean trabajos y estimulan mercados y economías locales.

4.2. Solución 2

La segunda solución plantea cambios para mejorar el confort térmico en el **interior**.

Para ello, en primer lugar, se construyen los cimientos de la casa a unos 50 cm bajo tierra, lo que permite mantener la vivienda con temperaturas interiores más suaves. Esto es debido a varios factores:

- 1). A que hay una menor incidencia de los rayos solares en la superficie de la casa.
- 2). Que la vivienda regula su temperatura por convección con la temperatura de la tierra subterránea circundante.

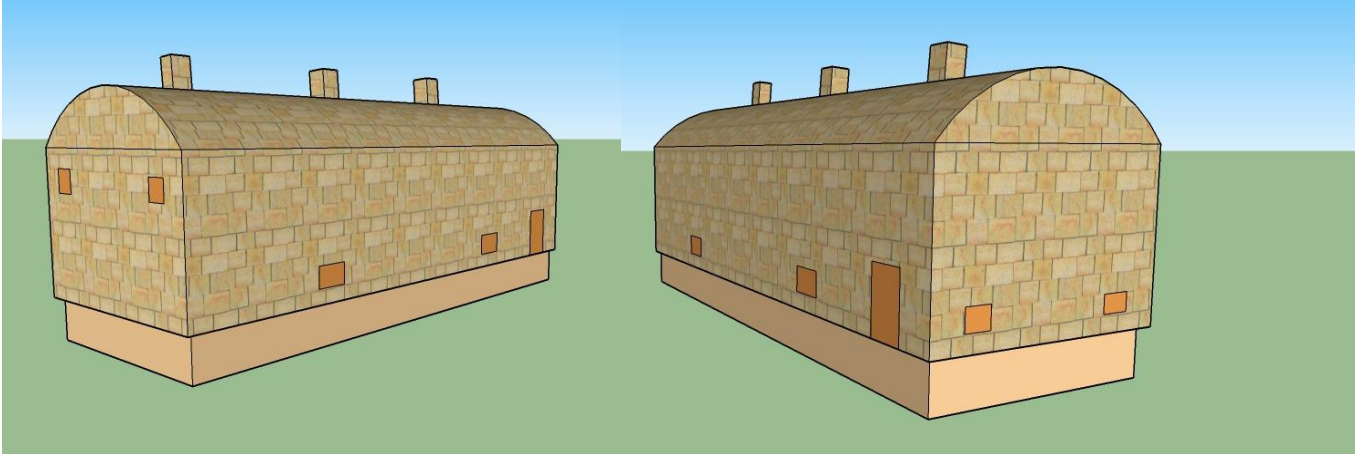


Figura 4.13: *Solución 2*

3). Recibe menor radiación reflejada del entorno en sus paredes

Además de esta mejora, se plantea en la solución 2 la inclusión de más ventanas, estratégicamente colocadas, y chimeneas en el techo, para que la convección del aire ayude a refrescar la casa. Ambos elementos con cierres para mantener el calor en las noches y temporadas de frío nocturno.

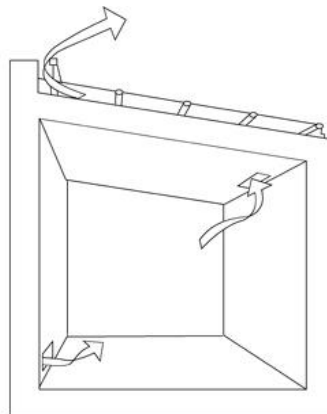


Figura 4.14: *Circulación del aire*

Las ventanas se encontrarán por una de las paredes a ras del suelo (como en la actualidad) dadas las características de uso y comodidad y en la pared opuesta cercanas al techo para la circulación del aire en el interior.

Así quedarían cada uno de los laterales de la vivienda en cuestión.

4.2.1. Dificultad de elaboración

En este caso, la dificultad sólo estriba en excavar para hacer los cimientos y añadir unas cuantas ventanas y chimeneas significa únicamente más tiempo, y apenas algo más de material. Por contrapartida ofrece grandes cambios de comodidad térmica.

4.2.2. Obtención de materiales

Los materiales son los mismos que se utilizan para el resto de la vivienda, así que no supone ninguna búsqueda u obtención adicional de materiales.

4.3. Solución 3

La última de las soluciones propone cambios en el exterior que redunden en beneficios térmicos para la vivienda.

El primero de ellos es recubrir los muros exteriores y la bóveda de cal, dejando toda la vivienda recubierta. Como la cal tiene una conductividad térmica bastante baja, impide la entrada del flujo de calor por conducción y una resistencia térmica alta que evita que absorba el calor. Además de ésta, cuenta con muchas ventajas:

- Tiene una alta difusividad al vapor de agua y también es un material enormemente eficiente. La durabilidad de la cal es uno de sus mayores puntos fuertes en comparación con el cemento.
- Su color blanco refleja los rayos solares
- Mejora la estructura de los suelos, sobre todo de los arcillosos, los hace menos compactos y los ahueca, facilitando que puedan absorber el agua del riego o de la lluvia.
- Ausencia de retracción debido a la estabilidad volumétrica frente a la humedad.
- Adaptación a las deformaciones y bajo riesgo de agrietamiento debido a su elasticidad
- Permeabilidad al vapor de agua debido a su porosidad para permitir la carbonatación del óxido cálcico, que confiere transpirabilidad y evita las condensaciones, además de proporcionar un buen aislamiento térmico y acústico
- No provoca eflorescencias ya que no contiene sales solubles
- Permite realizar capas más finas que los morteros de cemento
- Garantizan el sellado y estucado
- Resistencia a la penetración de agua de lluvia
- Desinfectante y fungicida natural debido a la alcalinidad de la cal
- Ignífugo, no produce gases tóxicos

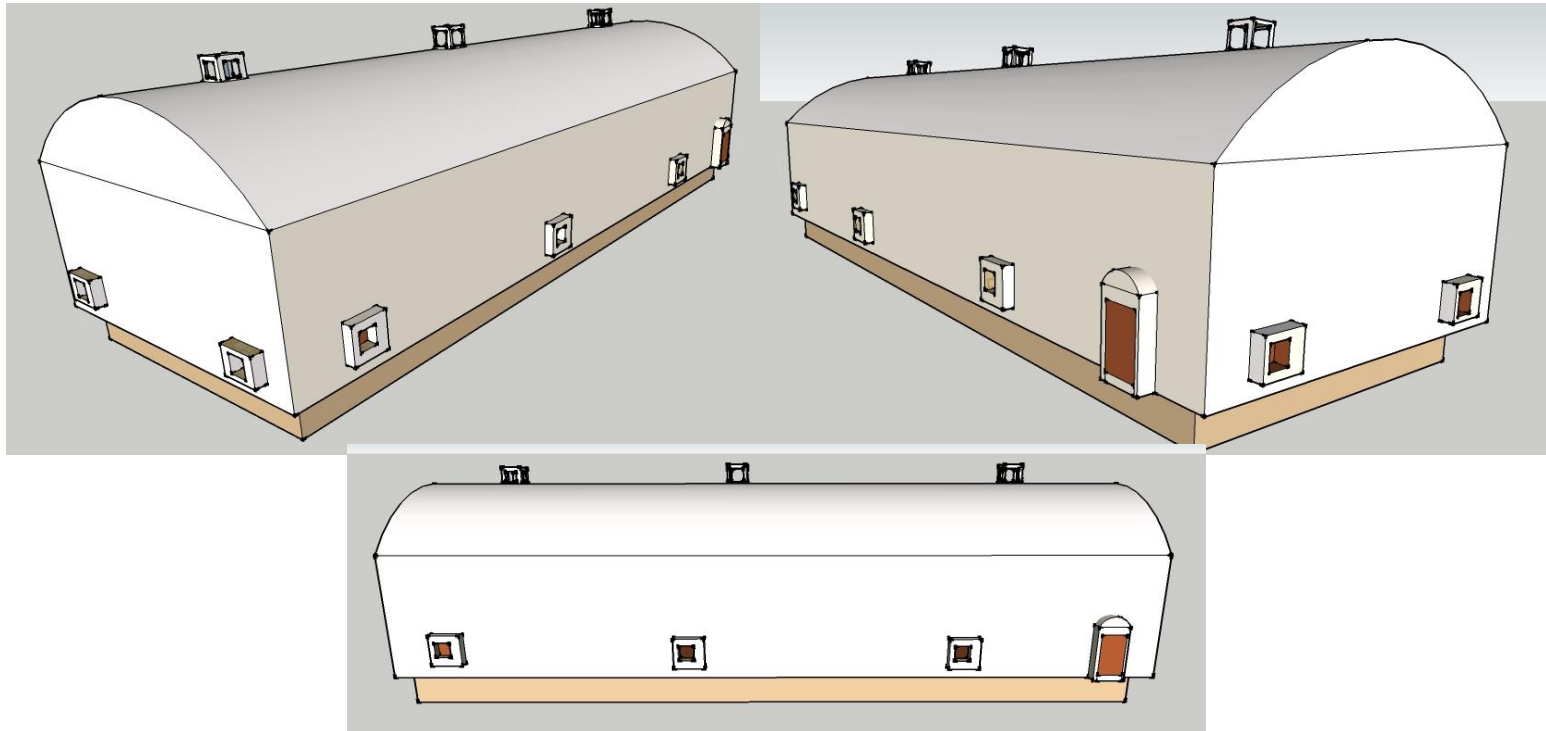


Figura 4.15: *Solución 3*

La segunda de las propuestas para esta solución es la creación de unos salientes en las ventanas y puertas que creen más sombra en las zonas de entrada del flujo de calor, como podemos ver en las imágenes.

Y la tercera es la creación de un entorno sombreado, mediante la plantación de árboles y arbustos alrededor. De esta forma la sombra incidirá sobre la vivienda disminuyendo el flujo de calor hacia el interior de la misma.



Figura 4.16: *Solución 3 en la daira*



Figura 4.17: *Solución 3 panorámica*

Pero no sólo eso, sino que también es importante una mínima maleza que garantice que la elevada radiación del sol reflejada por la arena, que luego incide sobre los muros de la vivienda se vea reducida considerablemente.

4.3.1. Dificultad de elaboración

La aplicación de la primera de las propuestas de esta solución, que es recubrir de cal el exterior de la vivienda, es bastante sencilla, casi como pintar el exterior de una casa.

En cuanto a hacer un reborde sombreado a las ventanas y puertas, no es tarea complicada y sin embargo redundante en beneficios notables.

Y por último, la plantación de árboles y arbustos, es quizá la más complicada, aunque no inasequible. Requiere de buscar vegetación autóctona que no requiera de mucho mantenimiento.

4.3.2. Obtención de materiales

El adobe es un material del que a estas alturas ya disponemos. La cal se puede adquirir en Tinduf sin dificultad.

En cuanto a las palmeras también se pueden adquirir en Tinduf aunque sí significaría un coste económico adicional, aunque no muy elevado.

5. Estimación del efecto de las mejoras propuestas

5.1. Mejoras del adobe

Analicemos ahora en qué medida las soluciones propuestas revierten en cambios sustanciales o no para la consecución de los objetivos propuestos.

En primer lugar, vamos a analizar el cambio más sustancial de la investigación: la bóveda nubiana. Para ello recogemos en una tabla las diferentes propiedades térmicas de los materiales de construcción para ver en qué medida cambian estos parámetros.

	CASA TIPO		SOLUCIÓN 1	
	Paredes: Adobe	Techo: chapa de zinc	Paredes: Adobe	Techo: Adobe
Área (m ²)	90	28	90	35 aprox.
Espesor e (m)	0.30	0.001	0.60	0.24
Conductividad térmica λ (W/m·K)	0.82	110	0.82	0.82
Resistencia térmica $R = e/\lambda$	0.37	0.000009	0.73	0.29
Absortividad específica	0.65	0.55	0.65	0.65
Reflectividad	0.35	0.45	0.35	0.35
Emisividad	0.97	0.055	0.97	0.97
Densidad ρ (kg/m ³)	1650	7200	1650	1650
Transmitancia térmica U (W/m ² ·K)	2.70	111111.11	1.37	3.45
Calor específico Cp J/kg ·K	1100	380	1100	1100

Cuadro 5.1: Mejoras térmicas con el adobe

Analicemos cada uno de los apartados.

Observamos así, en primer lugar, que el **área** de la casa tipo con respecto a la solución 1 no cambia en cuanto a las paredes, pero sí con respecto al techo, que al tratarse en la solución 1 de una bóveda, la superficie aumenta. Este aumento proporcionará ventajas a la hora de la ventilación del edificio. Asimismo, la forma de bóveda garantiza una menor exposición a la radiación solar, garantizando zonas sombreadas en la práctica totalidad de la jornada.

El **espesor**, es uno de los primeros cambios que se aplica a la solución 1 en que los ladrillos de las paredes pasan de 30 a 60 cm. Veremos con los siguientes parámetros como esto afecta en las variaciones térmicas.

En cuanto al techo, el espesor también varía de 0,001 a 0,24 metros

La **conductividad térmica** del adobe es constante y así queda reflejado en la tabla con un valor de 0,82 W/m·K. Si observamos la conductividad de la chapa de zinc apreciamos que es unas 134 veces mayor que la del adobe, por lo que la capacidad de conducción del calor se dispara al compararla con el adobe.

La **resistencia térmica** de un material representa la capacidad del material de oponerse al flujo del calor. En el caso de materiales homogéneos es la razón entre el espesor y la conductividad térmica del material. Por ello, observamos en la tabla cómo este valor aumenta considerablemente en la solución 1 porque el espesor del ladrillo es mayor y por tanto también su resistencia al flujo de calor.

Ahora bien, si miramos la resistencia térmica de la chapa de zinc vemos que es demasiado baja. Unas 32.000 veces menor. Definitivamente, vale la pena sustituir este material para el techo.

En cuanto a la **absortividad**, sabemos que es la propiedad de un material que determina la cantidad de radiación incidente que puede absorber. Observamos que la chapa de zinc tiene una absortividad inferior, lo que hace que propague más el calor.

La **reflectividad** de la chapa de zinc, como se muestra en la tabla, es ligeramente mayor que la del adobe y hacer referencia a la fracción de radiación incidente reflejada por una superficie.

Asimismo, la **emisividad** de la chapa de zinc es menor porque la proporción de radiación térmica emitida por esta superficie debida a su temperatura es menor. A pesar de que este dato pudiera parecer contradictorio, si lo cotejamos en conjunto con el calor específico, nos damos cuenta de que aunque a una temperatura estándar la emisividad de este material es menor, es mucho más susceptible a cambiar que el adobe en cuanto a su calor específico y la transmitancia térmica.

La **densidad** de la chapa de zinc es mayor.

La **transmitancia térmica** nos llama mucho la atención en esta tabla. Pues siendo la medida del calor que fluye por unidad de tiempo y superficie, observamos que es unas 32.000 veces mayor, en concordancia con los datos de la resistencia térmica.

Y por último, el **calor específico** de la chapa de zinc es 2,89 veces menor que el del adobe; pues la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una zinc para elevar su temperatura en una unidad es menor. Aumenta con más facilidad.

5.2. Simulación FreeFem

El programa FreeFem proporciona interesantes posibilidades de simulación en 2D y 3D de diferentes características térmicas de los cuerpos y sus materiales.

Así, en esta investigación quiero introducir simulaciones de la vivienda tipo y las soluciones que propongo, que nos permitan valorar térmicamente el efecto de las mejoras.

A continuación adjunto al diseño FreeFem una imagen explicativa para una mejor comprensión del esquema de análisis del FreeFem.

En ella podemos ver cómo se analiza la mitad de un lateral de la vivienda y la porción de tierra que le rodea en superficie. En la simulación FreeFem se expone lo mismo, pero mediante líneas de color que representan las variaciones de temperatura.

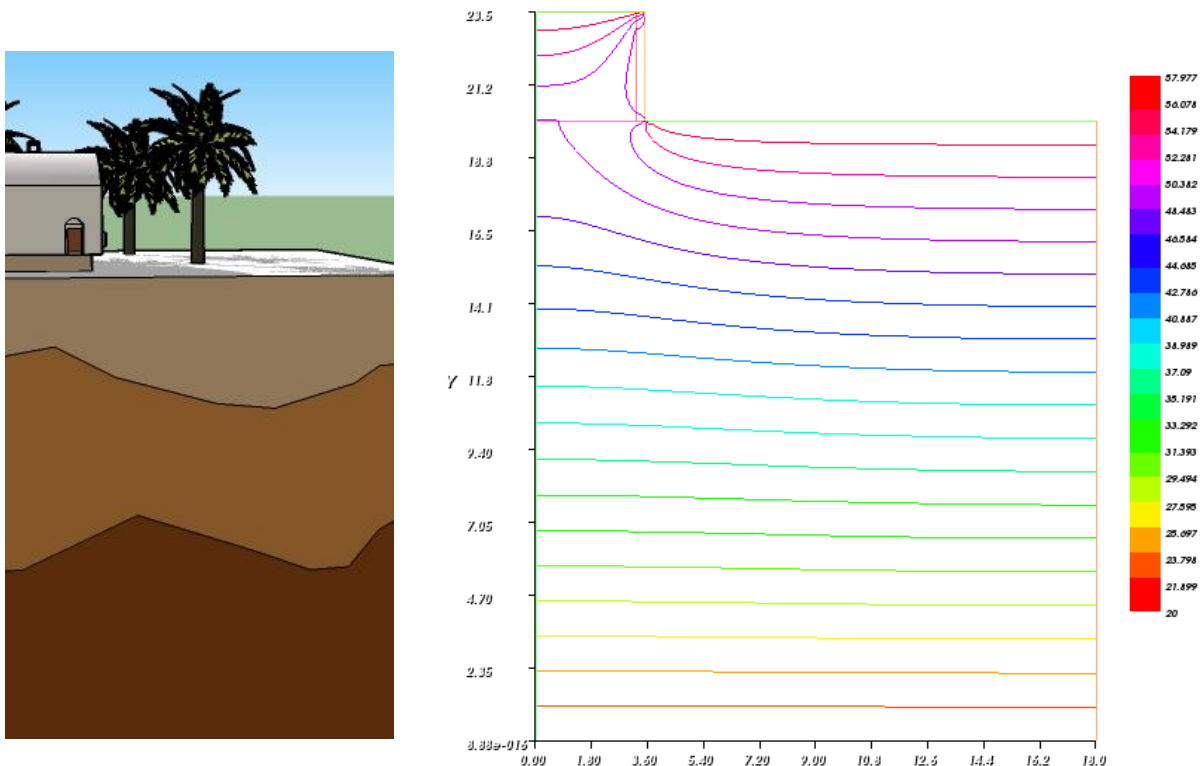


Figura 5.1: Esquema explicativo y Figura 5.2: FreeFem

PLANTEAMIENTO DEL MODELO

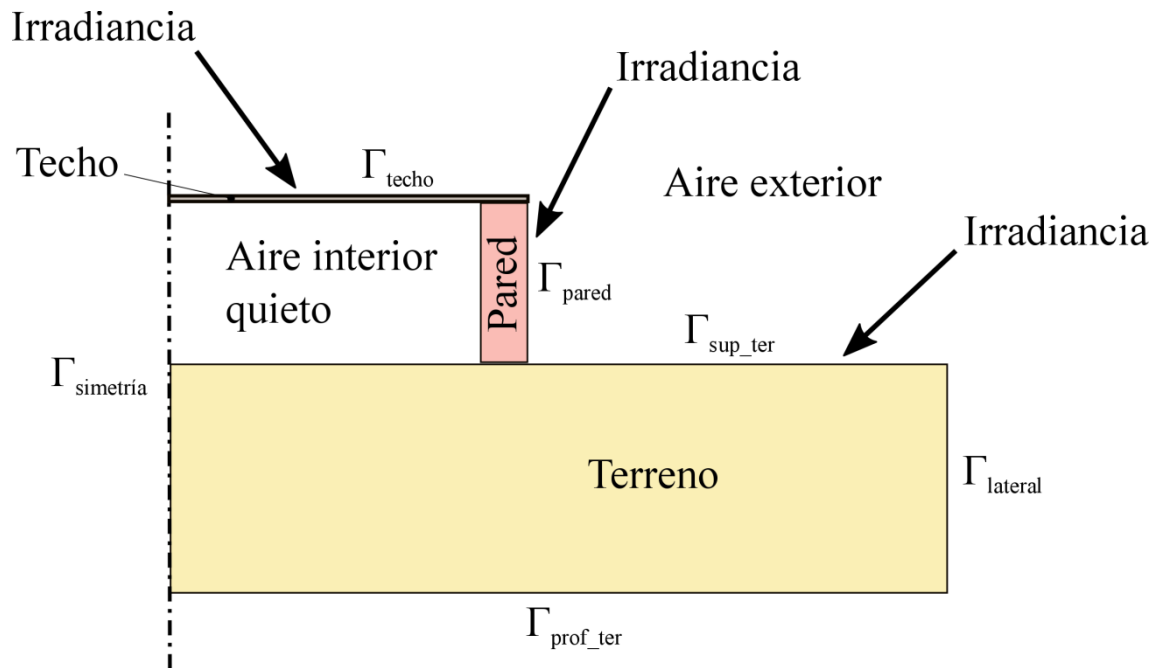


Figura 5.3: *Planteamiento del modelo*

Esta figura, clarifica los factores que van a entrar en análisis con este simulador.

De esta forma, se dibujan las fronteras en que vamos a estudiar los flujos de calor, delimitados por un eje de simetría que lo único que señala es que a efectos de simplificación, se estudiará la mitad de la vivienda, sin que esto afecte en los resultados vertidos.

En las condiciones de simulación se considera que el aire del interior no se mueve y lo que se estudia es la irradiancia en techo, paredes y terreno circundante. Veamos más concretamente cómo se concreta mediante fórmulas el planteamiento.

En el contorno lateral la influencia del edificio es mínima por lo que se puede suponer un flujo de calor unid mensual en la dirección y con lo que la variación de la temperatura con respecto a este contorno es despreciable.

Añado a continuación las fórmulas que hemos introducido para regir los flujos del calor, y adjunto en el anexo dos la programación específica y concreta que hemos realizado en el FreeFem para cada una de las soluciones.

ECUACIÓN DIFERENCIAL DE LAPLACE

Tomando la ecuación diferencial de Laplace vamos a establecer las condiciones de frontera de la vivienda tipo considerando frontera al techo, la pared y el terreno.

$$\frac{\partial}{\partial u} \left(\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \frac{T(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mathbf{K}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \frac{\partial T(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial y} \right) = 0$$

CONDICIONES DE FRONTERA

FÓRMULAS DEL TECHO

$$\Gamma_{\text{techo}}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = \alpha G - \frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{techo}}} - \frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{techo}}}$$

$$\frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{techo}}} = h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\infty})$$

$$\frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{techo}}} = \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{techo}}^4 - T_{\text{alr}}^4) \rightarrow$$

$$\epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{techo}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{techo}} + T_{\text{alr}}) (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\text{alr}})$$

$$\frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{techo}}} = \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{techo}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{techo}} + T_{\text{alr}}) (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\text{alr}})$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\infty}) - \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{techo}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{techo}} + T_{\text{alr}}) (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\text{alr}}) + \alpha G$$

$$h_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{techo}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{techo}} + T_{\text{alr}})$$

$$T_{\text{alr}} = T_{\infty}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = \alpha G - h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\infty}) - h_{\text{rad}} (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\infty})$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = \alpha G (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) (T(x,y)_{\text{techo}} - T_{\infty})$$

$$h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}} = h_{\text{total}}$$

$$-K_{\text{techo}} \cdot \frac{dT(x,y)}{dy} \Bigg|_{\Gamma_{\text{techo}}} = \alpha_{\text{techo}} G - h_{\text{total}} (T(x,y)_{\Gamma_{\text{techo}}} - T_{\infty})$$

FÓRMULAS DE LA PARED

$$\Gamma_{\text{pared}}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{pared}}} = \alpha \Gamma_{\text{techo}} G - \frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{pared}}} - \frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{pared}}}$$

$$\frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{pared}}} = h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{pared}} - T_{\infty})$$

$$\frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{pared}}} = \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{pared}}^4 - T_{\text{alr}}^4) \rightarrow$$

$$\epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{pared}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{pared}} + T_{\text{alr}}) (T(x,y)_{\text{pared}} - T_{\text{alr}})$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{pared}} - T_{\infty}) - \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{pared}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{pared}} + T_{\text{alr}}) (T(x,y)_{\text{pared}} - T_{\text{alr}}) + \alpha G$$

$$h_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T(x,y)_{\text{pared}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T(x,y)_{\text{pared}} + T_{\text{alr}})$$

$$T_{\text{alr}} = T_{\infty}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{techo}}} = (h_{\text{conv}} - h_{\text{rad}}) (T(x,y) - T_{\infty}) + \alpha G = \alpha G - (h_{\text{rad}} + h_{\text{conv}}) (T(x,y) - T_{\infty})$$

$$-K_{\text{techo}} \cdot \frac{dT(x,y)}{dy} \Bigg|_{\Gamma_{\text{pared}}} = \alpha_{\text{pared}} G - h_{\text{total}} (T(x,y) \Gamma_{\text{pared}} - T_{\infty})$$

FÓRMULAS DE LA TIERRA

$$\Gamma_{\text{tierra}}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{tierra}}} = \alpha G - \frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{tierra}}} - \frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{tierra}}}$$

$$\frac{q_{\text{conv}}}{A_{\text{tierra}}} = h_{\text{conv}} (T(x,y)_{\text{tierra}} - T_{\infty})$$

$$\frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{tierra}}} = \epsilon \sigma (T_{(x,y)_{\text{tierra}}}^4 - T_{\text{alr}}^4) \rightarrow$$

$$\epsilon \sigma (T_{(x,y)_{\text{tierra}}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} + T_{\text{alr}}) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\text{alr}})$$

$$\frac{q_{\text{rad}}}{A_{\text{tierra}}} = \epsilon \sigma (T_{(x,y)_{\text{tierra}}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} + T_{\text{alr}}) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\text{alr}})$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{tierra}}} = h_{\text{conv}} (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\infty}) - \epsilon \sigma (T_{(x,y)_{\text{tierra}}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} + T_{\text{alr}}) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\text{alr}}) + \alpha G$$

$$h_{\text{rad}} = \epsilon \sigma (T_{(x,y)_{\text{tierra}}}^2 + T_{\text{alr}}^2) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} + T_{\text{alr}})$$

$$T_{\text{alr}} = T_{\infty}$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{tierra}}} = \alpha G h_{\text{conv}} - h_{\text{conv}} (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\infty}) - h_{\text{rad}} (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\infty})$$

$$\frac{q_{\text{cond}}}{A_{\text{tierra}}} = \alpha G (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) (T_{(x,y)_{\text{tierra}}} - T_{\infty})$$

$$h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}} = h_{\text{total}}$$

$$-K_{\text{tierra}} \cdot \frac{dT(x,y)}{dy} \Big|_{\Gamma_{\text{tierra}}} = \alpha_{\text{tierra}} G - h_{\text{total}} (T_{(x,y)} \Gamma_{\text{tierra}} - T_{\infty})$$

$\Gamma_{\text{simétrica}}$

Por consideración de la simetría del problema

$$\Gamma_{\text{simétrica}} \rightarrow \frac{dT(x,y)}{dx} \Big|_{\Gamma_{\text{simétrica}}} = 0$$

Por lo que implica que el flujo de calor sea 0

Γ_{lateral}

En el contorno lateral la influencia del edificio es mínima, por lo que se puede suponer un flujo de calor unidimensional en la dirección y ; con lo que la variación de la temperatura con respecto a este contorno es despreciable:

$$\Gamma_{\text{lateral}} \rightarrow \left. \frac{dT(x,y)}{dx} \right|_{\Gamma_{\text{lateral}}} = 0$$

5.2.1. Vivienda tipo

Recordemos que sus características son, paredes de adobe de 30cm de espesor y techo de plancha metálica.

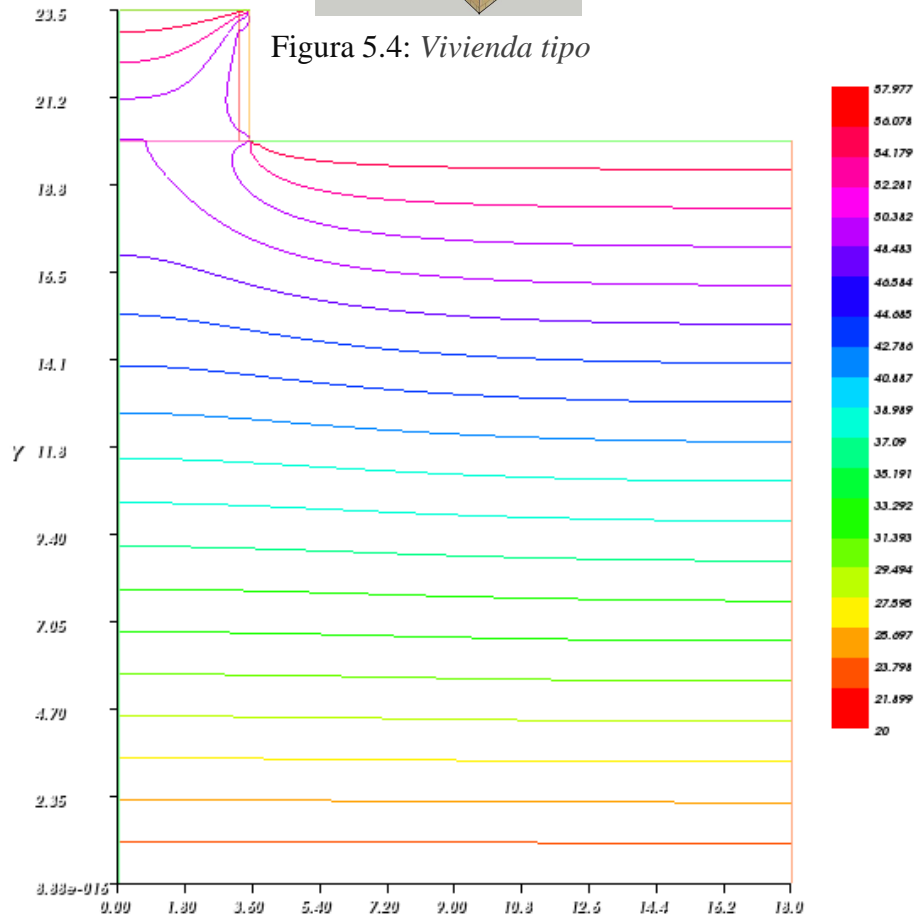
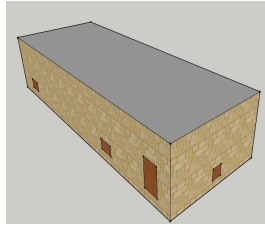


Figura 5.5: Freeform vivienda tipo

En el gráfico de la vivienda tipo podemos ver la representación de la mitad de uno de los lados de la vivienda de 3,5m, junto a una porción de terreno de 18 x 20 m.

En la vivienda tipo apreciamos que hay una pared de adobe con espesor de 30cm y un techo de plancha de zinc de 1 mm de espesor.

En la parte derecha podemos observar los diferentes colores que se asignan a las distintas temperaturas y que varían desde los 25° a 64°, que es la mayor temperatura que alcanza el interior de la vivienda en las proximidades del techo.

Una vez comprendido lo que la gráfica representa, pasemos a analizarla:

En primer lugar observemos la porción de terreno.

Observamos que a medida que profundizamos en la tierra, la temperatura va disminuyendo con las líneas de color que indican su reducción pasando por todo el espectro de colores de la leyenda.

También podemos apreciar que a medida que nos acercamos a la superficie, las líneas toman otra ondulación. Esto es debido a que la tierra que se encuentra debajo de la vivienda no recibe tantos flujos de calor por conducción y radiación como la que se encuentra cerca de la superficie en contacto directo con la radiación solar.

De este modo nos encontramos que en los cuatro metros más superficiales las temperaturas de la tierra en las inmediaciones de la casa van de unos 48 a unos 57°, mientras que en la tierra que se encuentra bajo la casa van de los 44 a 48°.

De esto nos resulta una variación media de 6.5°.

En segundo lugar analicemos el interior de la vivienda. Se hace muy visible que en torno al techo de chapa metálica la temperatura asciende. Lo cual nos confirma lo poco apropiado que se hace este material para este tipo de vivienda. Pues pasamos de un suelo de unos 50° a unos casi 58° en las inmediaciones del techo.

En el siguiente gráfico, podemos apreciar mejor las variaciones de temperatura en el interior de la vivienda. Observamos que las temperaturas más bajas se encuentran en las inmediaciones del muro de adobe, mientras que el reparto del calor es casi homogéneo por el resto de la estancia, con una media de temperatura aproximada de unos 60°.

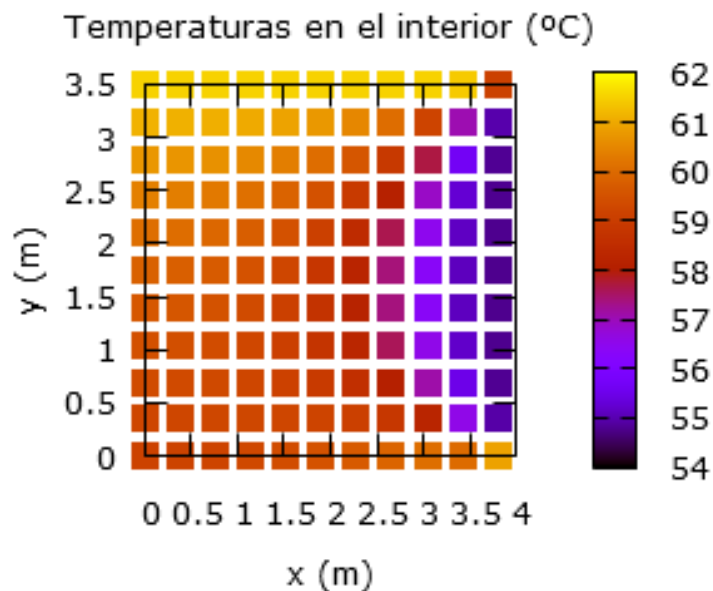


Figura 5.6: *Temperatura interior vivienda tipo*

5.2.2. Solución 1

Recordemos que la primera solución aportaba paredes con un mayor grosor (de 60 cm en lugar de 30) y la bóveda nubiana en el techo, fabricada con adobe.

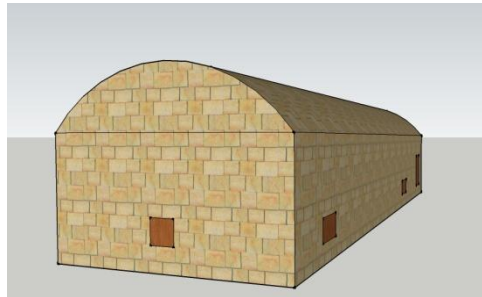


Figura 5.7: Solución 1

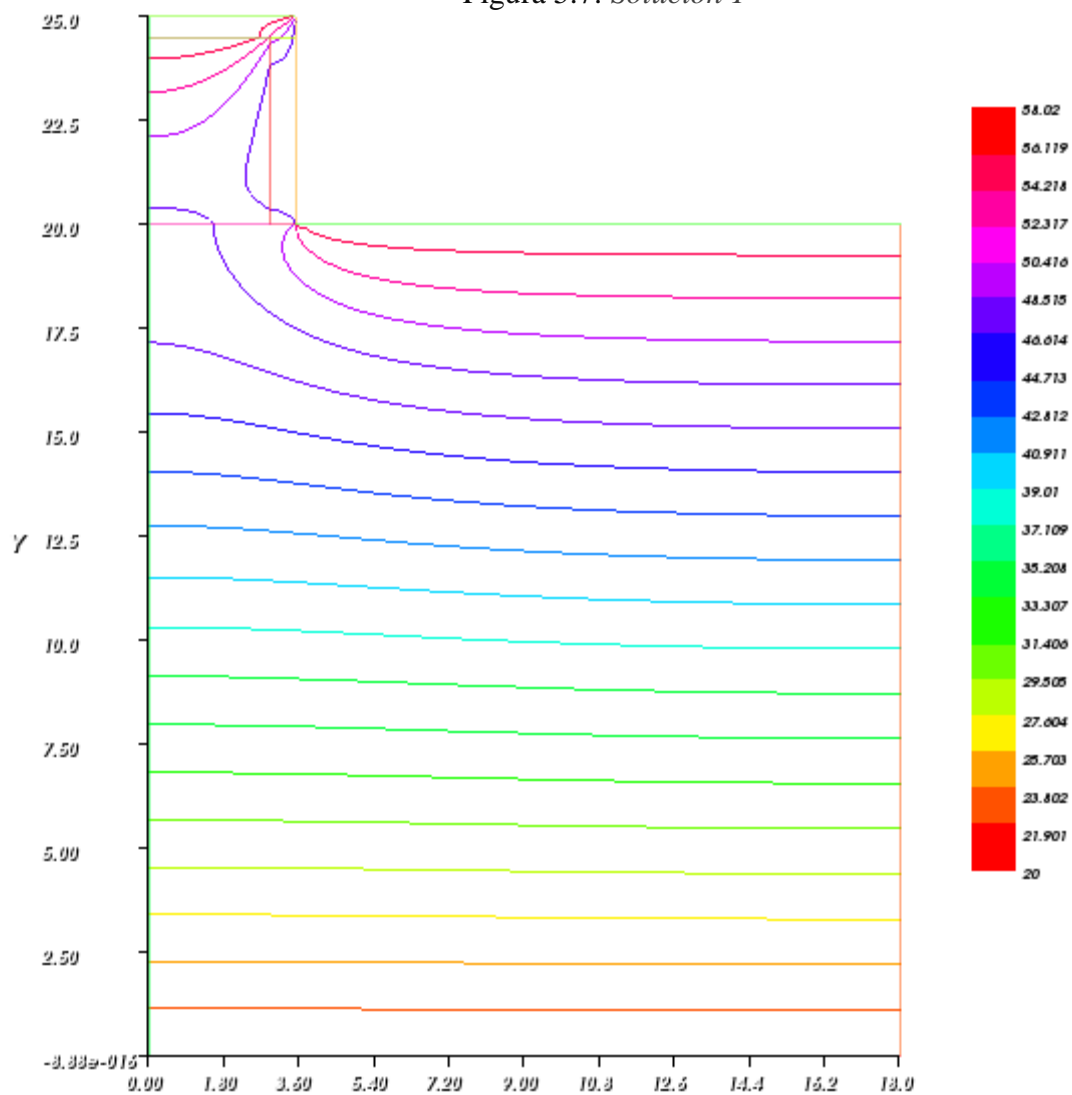


Figura 5.8: FreeFem solución 1

Con la bóveda, la vivienda adquiere más metros cúbicos de espacio interior. Si comparamos esta gráfica con la anterior observamos que temperaturas más bajas penetran hasta el interior de la vivienda gracias al aislamiento de muros más anchos en las paredes.

También usar el adobe en el techo como aislante térmico reduce las temperaturas en el interior de la vivienda.

Observemos en este caso la porción de tierra. Vemos ondulaciones más pronunciadas en las líneas de temperatura que hacen que temperaturas más bajas penetren hasta el interior y por un lateral de la vivienda gracias a muros más gruesos y a la bóveda.

De este modo la mitad de la vivienda más cercana al suelo oscila entre los 44 y 50° de temperatura; mientras que en el caso anterior oscilaba entre los 48ª y 59°. Hemos disminuido la temperatura interior de la vivienda considerablemente.

Vemos así en el siguiente gráfico de la figura 5.8., los cambios en la temperatura interior de la vivienda, si lo comparamos con la figura 5.7. perteneciente a la vivienda tipo.

Como podemos ver, pasamos de una predominancia de la temperatura en torno a los 60°; a otro gráfico en que las temperaturas cálidas ocupan la diagonal superior, que representa las temperaturas próximas al techo y en la diagonal inferior predominan temperaturas más suaves.

Podemos apreciar con facilidad como esta primera solución consistente en la introducción de la bóveda nubiana, cambia definitivamente el panorama del flujo de calor en el interior de la vivienda, siendo el cambio más sustancial y definitivo de la investigación.

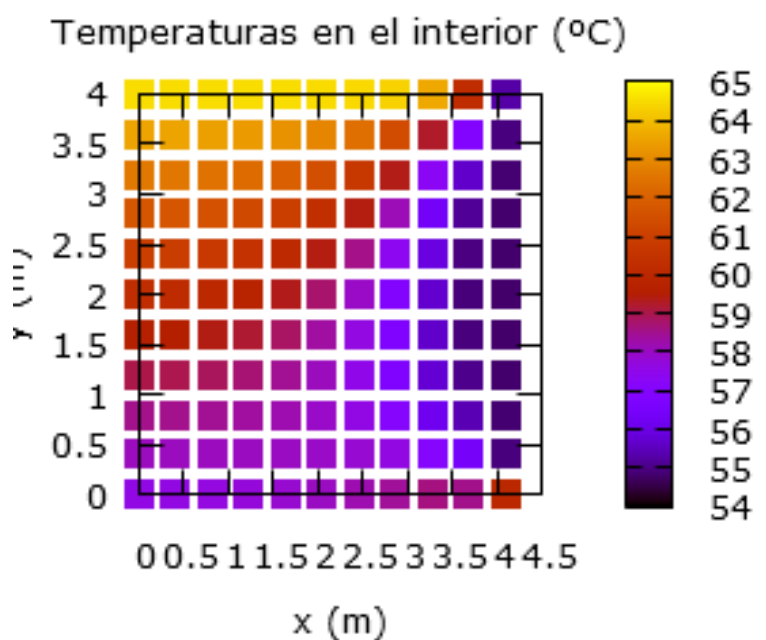
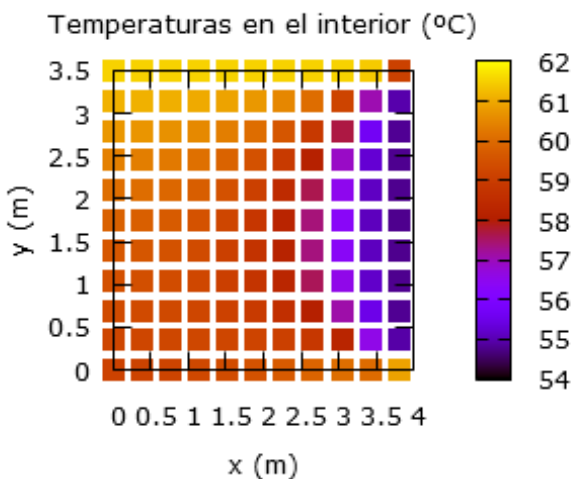


Figura 5.9: Temperatura interior vivienda tipo Figura 5.10: Temperatura interior solución

5.2.3. Solución 2

Recordemos que en esta solución se proponía enterrar los cimientos de la casa 50 cm bajo tierra para refrescar el interior y la inclusión de ventanas y chimeneas de ventilación.

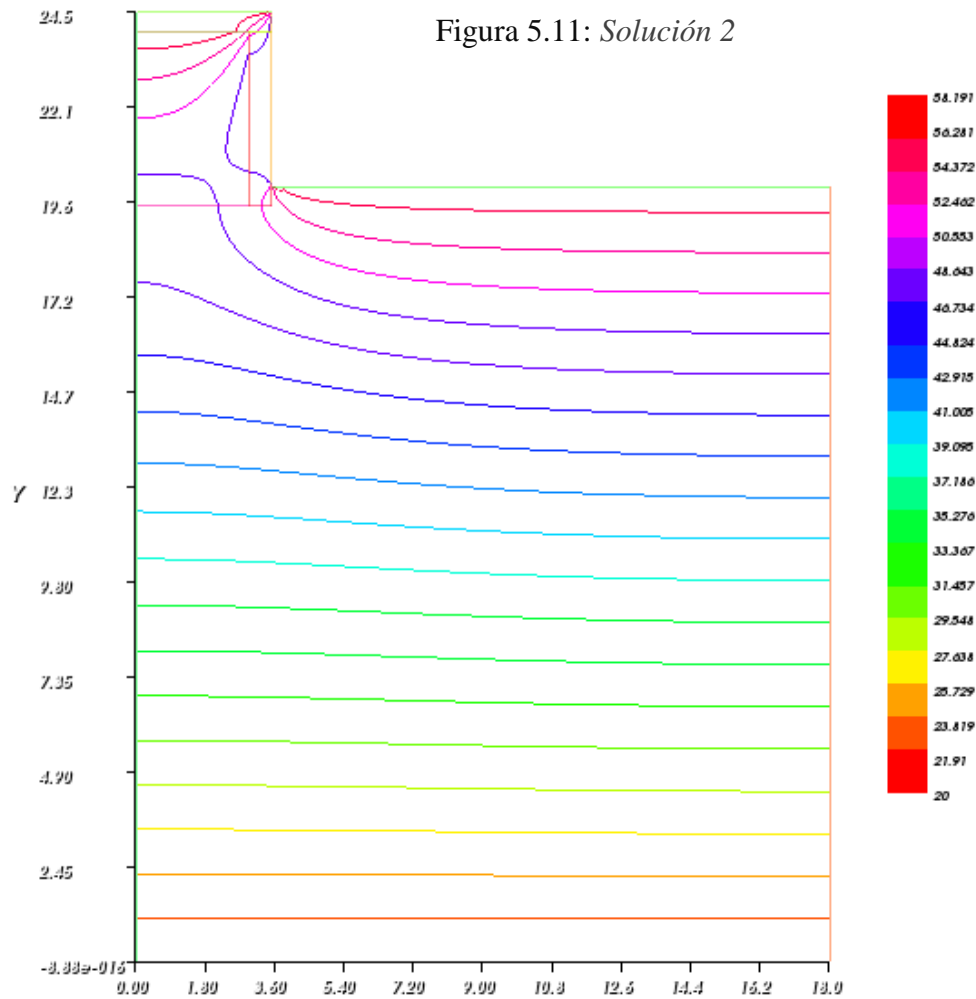
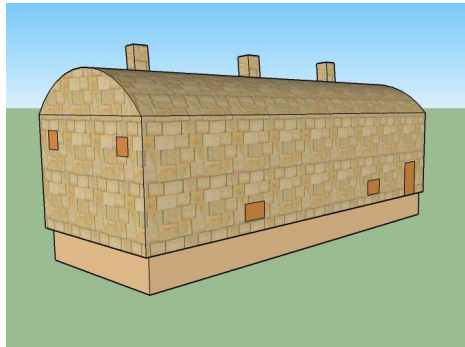


Figura 5.12: *FreeFem solución 2*

Con respecto a los gráficos anteriores, la variación más importante es la curva azul correspondiente a los 44° que penetra en la vivienda ocupando un volumen mucho mayor gracias al enterramiento de los cimientos.

En cuanto a la gráfica de la figura 5.11 observamos una variación con respecto a la anterior, en que las disposiciones por colores claros y oscuros se mantienen, solo que la diagonal inferior oscurece más sus tonalidades, entendiéndose por tanto, que disminuyen las temperaturas ligeramente en las proximidades del suelo, resultado del enterramiento de los cimientos en esta solución.

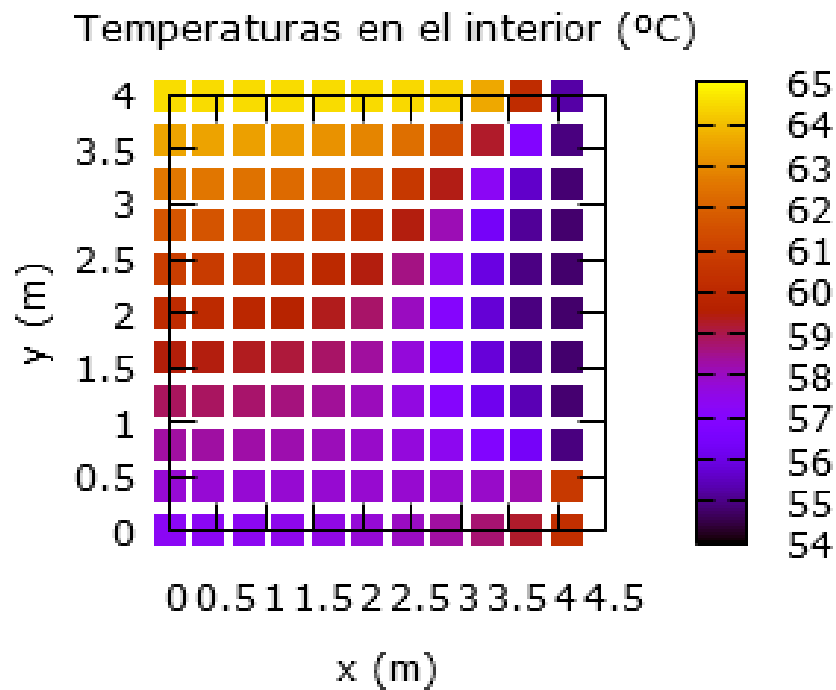


Figura 5.13: *Temperatura interior solución 2*

5.2.4. Solución 3

En la solución 3, la última y definitiva los cambios que se realizan son exteriores añadiendo unos rebordes a ventanas y puertas, cubriendo de cal la vivienda y poblando árboles y arbustos a su alrededor para crear sombra y disminuir la irradiación reflectada del suelo proveniente del sol.

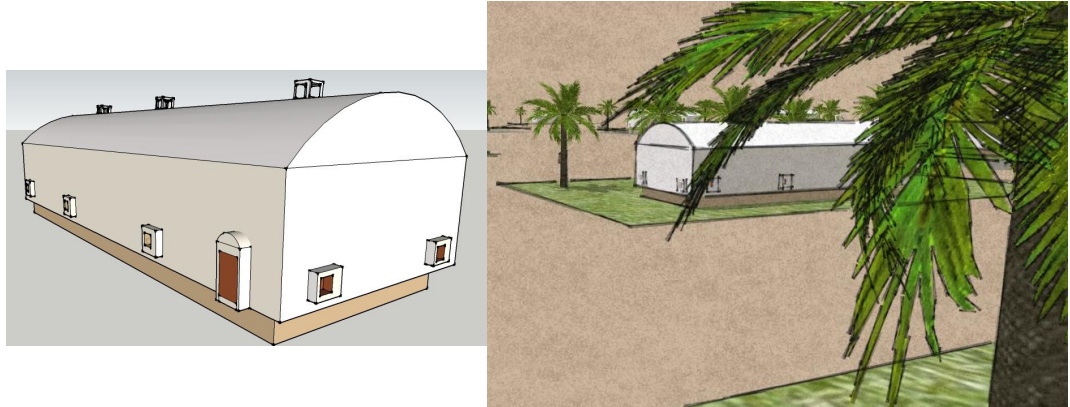


Figura 5.14: Solución 3

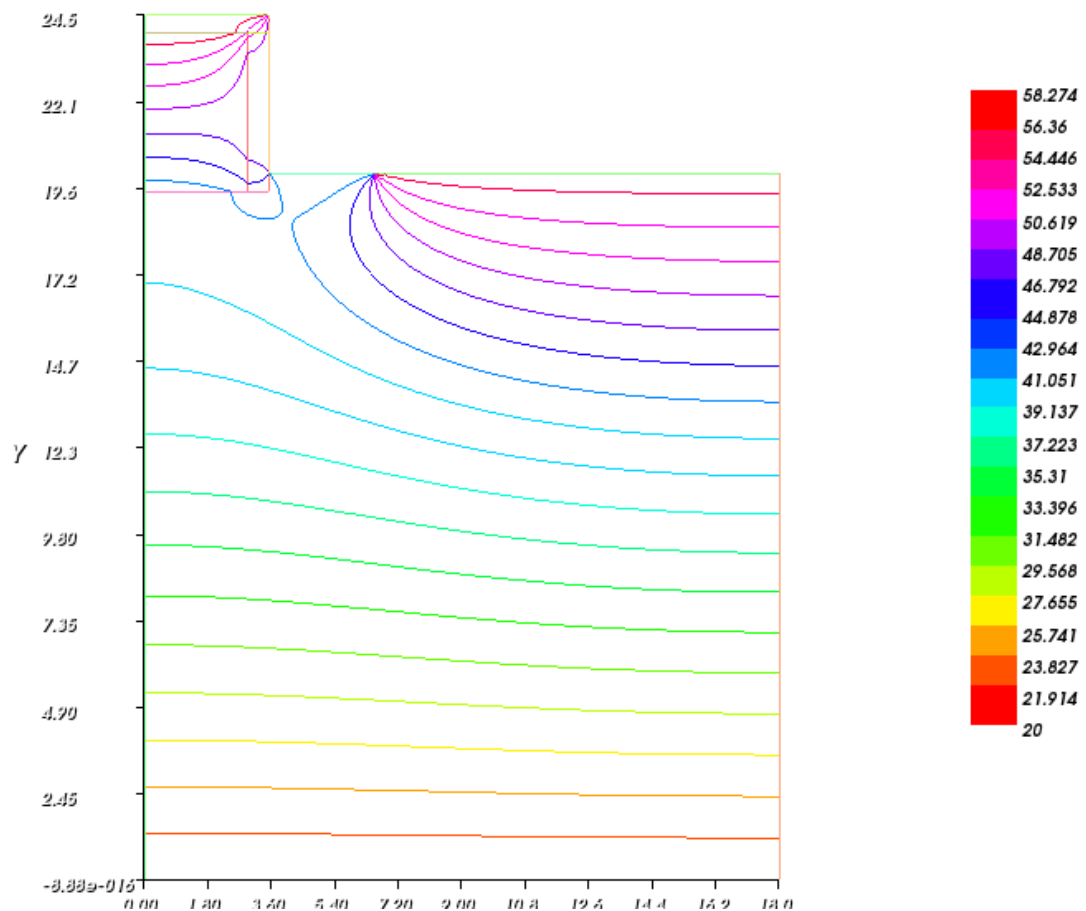


Figura 5.15: FreeFem solución 3

En este último gráfico, por contraste con los anteriores, vemos que en la porción de terreno se reflejan fuertes variaciones en las ondulaciones de las líneas de temperatura, indicando incluso su retracción en tonos azules en las inmediaciones de la vivienda.

Esto es debido a la vegetación que se incluye en esta propuesta y que impide que el calor por irradiación del suelo pase por conducción a las paredes de la vivienda. Así, conseguimos que incluso la superficie del suelo alrededor de la casa sea de 41°. Una diferencia de 17° con respecto a la casa tipo.

Esta circunstancia no influye sólo en la temperatura superficial y en profundidad de las inmediaciones de la casa, sino también en los flujos de calor que penetran en la casa, que son mucho menos acusados.

La cobertura del exterior con cal también ayuda con la reflectividad de los rayos solares, reduciendo el volumen de calor que penetra al interior de la vivienda.

Las conclusiones que por tanto se extraen en estas gráficas de forma comparativa es que la porción de tierra hasta 4 m por debajo de la casa pasa de 46° de media en la casa tipo a 39° en la última de las soluciones.

Y en el interior de la vivienda pasan de dominar temperaturas en torno a los 54° a dominar temperaturas en torno a los 44° de media.

Por tanto hemos ganado aproximadamente 10° de descenso en la temperatura media del interior de la vivienda. De esta forma, el interior de la vivienda gana considerablemente en confort térmico.

Por si fuera poco, las inmediaciones de la vivienda se mantienen también frescas, lo que permite mejorar la calidad de vida en sus inmediaciones. Estos espacios son muy utilizados por la sociedad saharai como lugares de socialización con vecinos y de compartir el té en busca de sombra y de refrescarse.

En el gráfico de las temperaturas, de la figura 5.14

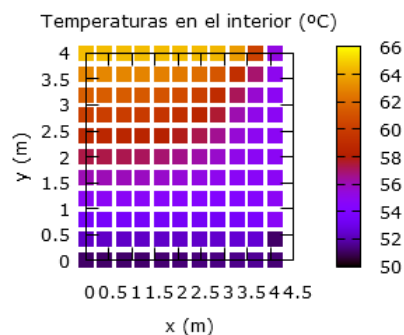


Figura 5.16: *Temperatura interior solución 2*

A continuación voy a apilar los cuatro casos para una mejor comparación visual:

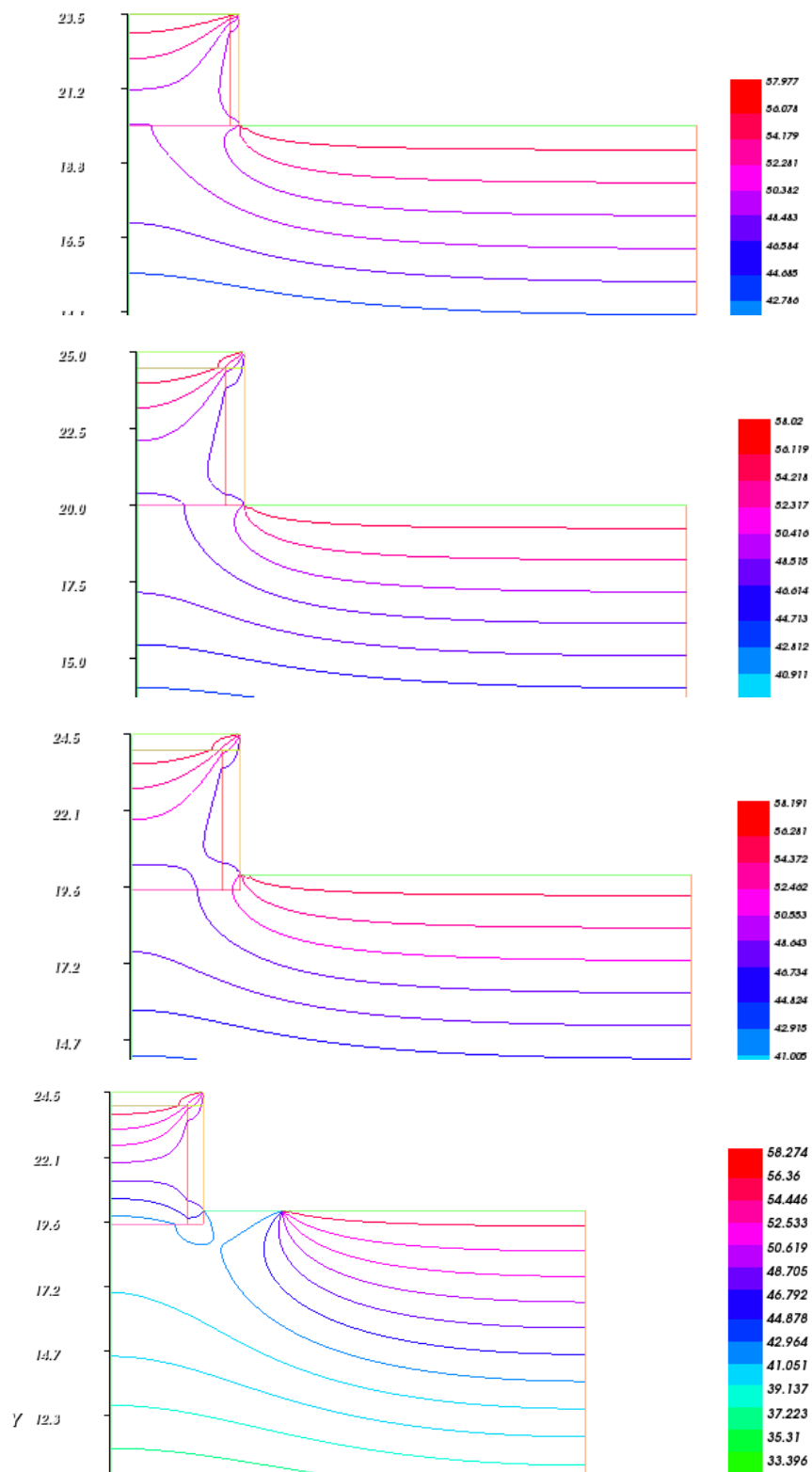


Figura 5.17: Comparativa soluciones Freefem

5.2. Comparativa de cambios

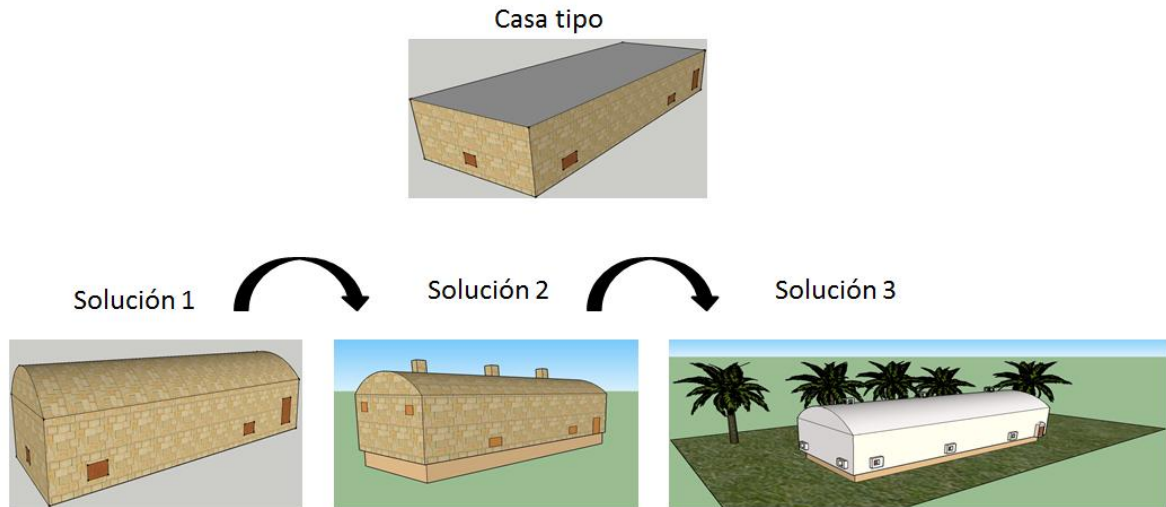


Figura 5.18: Esquema comparativo

Queda plasmada en esta imagen el recorrido de cambios propuestos desde la casa tipo, hasta la solución definitiva.

5.3. Transferencia de calor en la solución definitiva

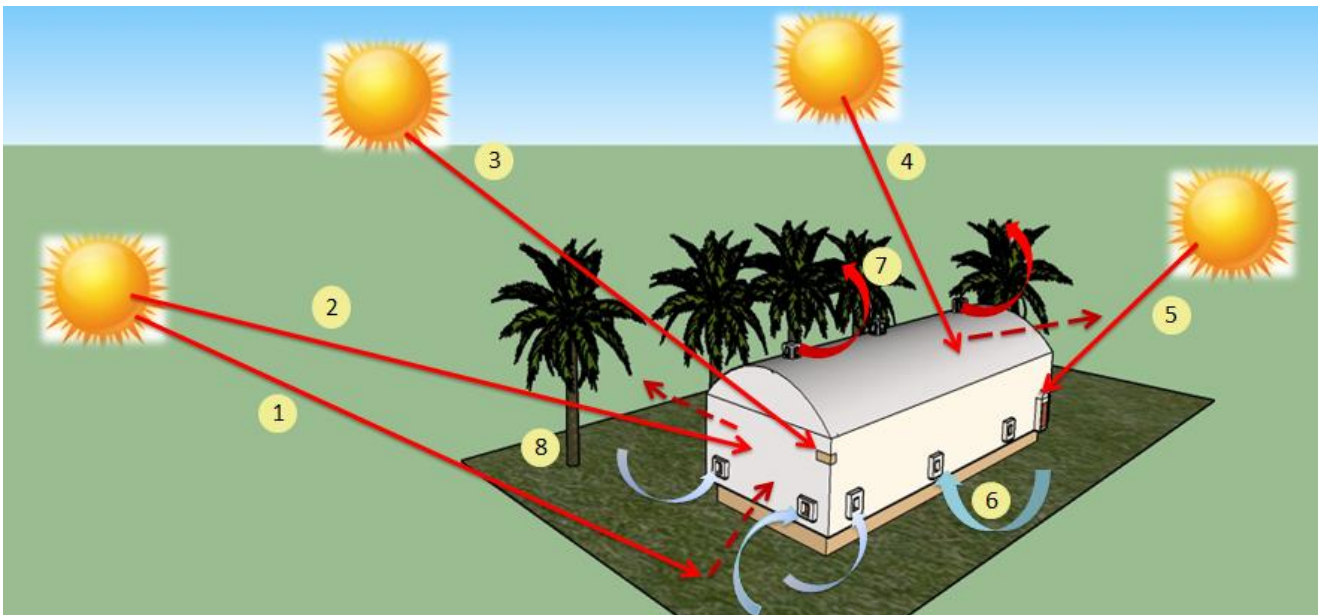


Figura 5.19: Esquema transferencia de calor

En esta imagen, quiero reunir las mejoras propuestas, bajo la perspectiva de la transferencia del calor y la ventilación de la vivienda:

1.- La radiación solar reflejada desde el suelo y hacia los muros de la vivienda ha disminuido considerablemente gracias a la vegetación que circunda la casa. Esto hace que los flujos de calor por radiación disminuyan.

2.- Se quiere mostrar que el recubrimiento exterior con cal refleja también la radiación solar dadas las propiedades que ya vimos de este material.

3.- Los flujos de calor por conducción se ven reducidos gracias a muros más gruesos, que dificultan la entrada de calor al interior.

4.- La forma de la bóveda nubiana hace que la radiación solar se refleje con más facilidad y permite que prácticamente todo el día haya una zona sombreada en el techo, lo que reduce los flujos de calor por conducción hacia el interior.

5.- Los rebordes en puertas y ventanas actúan como pantallas de radiación que sombrea y refrescan los lugares de circulación del aire.

6.- La inclusión de ventanas en la parte superior de la vivienda, así como de las chimeneas, facilita el flujo de calor por convección desde el exterior al interior de la vivienda, expulsando las masas de aire caliente por los conductos más elevados (punto 7)

8.- La sombra de las palmeras actúa al igual que la vegetación de las inmediaciones de la casa y además proyecta sombra directa sobre la vivienda, reduciendo así la radiación solar directa y el consecuente flujo de calor por conducción hacia el interior de la casa.

6. Conclusiones y líneas futuras

6.1. Conclusiones

Retomemos ahora los objetivos de la investigación para poder evaluar y concluir en qué medida hemos podido cumplir con los mismos:

- Mejorar el confort térmico de las viviendas
- Desarrollar mayor eficiencia energética en las mismas
- Disminuir los costes económicos a largo plazo

Mediante estas gráficas, podemos observar, como el **confort térmico** de la vivienda ha sufrido cambios notables, pasando de una predominancia de temperaturas muy elevadas, a otras temperaturas considerablemente más suaves.

Conseguida la mejora del confort térmico, se ha cumplido con el primer objetivo de la investigación.

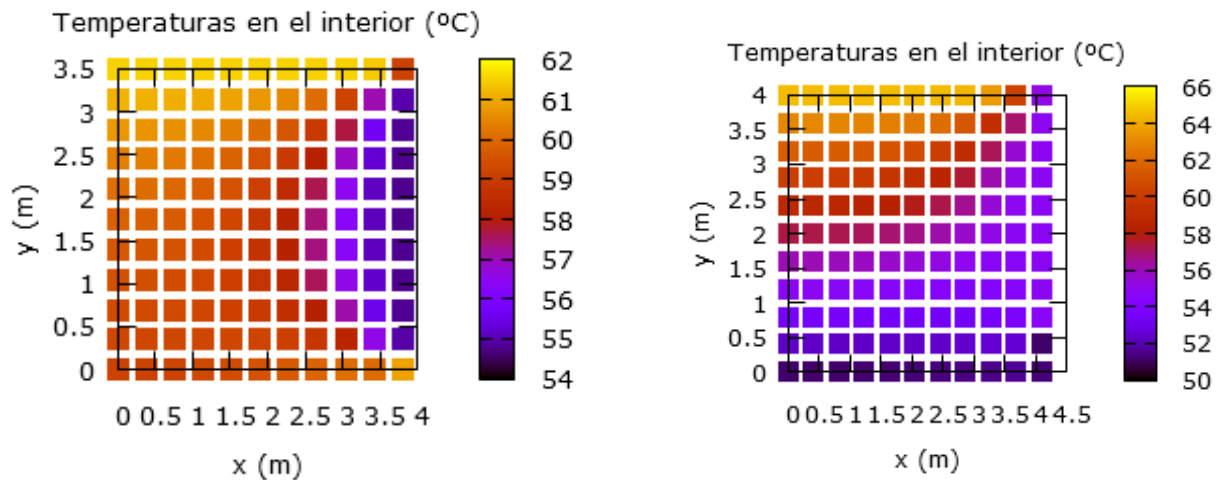


Figura 5.20: Comparativa de confort térmico

Entendiendo la eficiencia energética como “una práctica que tiene como objeto reducir el consumo de energía. La eficiencia energética es el uso eficiente de la energía, de esta manera optimizar los procesos productivos y el empleo de la energía utilizando lo mismo o menos para producir más bienes y servicios. Dicho de otra manera, producir más con menos energía”²

Así, podemos decir que a la vivienda tipo, se han le han practicado varios cambios que van en la línea de obtener una mayor eficiencia energética. Tales son:

- La eliminación del techo de zinc que generaba condiciones de calentamiento del interior de la casa, elevadas
- La construcción de muros más gruesos que aislen mejor del calor
- La bóveda nubiana reporta no sólo aislamiento sino una regulación térmica y circulación del aire en su interior
- Refrescamiento del interior de la vivienda enterrando los cimientos 50 cm bajo tierra.
- Creación de ventanas y chimeneas para la circulación del aire
- Revestimiento exterior de la vivienda con cal como aislante térmico
- Refrescamiento del suelo circundante mediante árboles y vegetación que reduzcan la irradiación y el paso de los flujos de calor por conducción a la vivienda.

Todas estas medidas reducen la necesidad del **consumo energético** derivado del uso de ventiladores y aire acondicionado. En el caso de los campamentos de refugiados saharauis, reducir el consumo energético es vital, dado no existe una red eléctrica; sino que la electricidad se obtiene por paneles solares.

La reducción, por tanto de este consumo energético a través de ventiladores y aire acondicionado, disminuye a su vez el desgaste de las baterías, bombas de agua de la ventilación, etc. Teniendo en cuenta que el uso que se hace de ventiladores, dadas las condiciones climatológicas de temperaturas muy elevadas todo el año, podemos entender el enorme ahorro económico que esto supone.

Además de la consecución de los objetivos que proponía desde un principio, existen también una serie de ventajas que también benefician al proyecto y que podríamos llamar indirectas y algunas desventajas:

6.1.1.Otras ventajas

Técnica flexible

Cada bóveda nubiana es realizada en función de las necesidades y se adapta por tanto a una forma y volúmenes propios de los usos previstos para el edificio. Una bóveda puede adosarse a una antigua o una segunda planta. La modularidad es una ventaja importante

² Wikipedia, enciclopedia libre: <http://es.wikipedia.org>

que permite a las familias que crecen, disfrutar de más espacio. Es fácil reorganizar los interiores (por ejemplo añadiendo o quitando tabiques internos, abriendo o cerrando entradas, ventanas o arcos) El techo puede ser utilizado como terraza o de superficie de secado.

Aislamiento del calor y regulación térmica

Las paredes minerales gruesas juegan un papel muy importante en la inercia térmica de un edificio.

Esta inercia es la que permite conservar el fresco de las noches entre las paredes durante el día e, inversamente, de restituir, por la noche, el calor almacenado por los muros durante el día. Cuanto más gruesa es la estructura, más fuerte es la inercia térmica, por lo que mayor insensibilidad tendrán los espacios interiores a las oscilaciones de la temperatura exterior.

Asimismo, la porosidad natural permite regular el grado de humedad en el ambiente. Estos argumentos de bienestar son muy populares en la transmisión de los clientes con el entorno.

Ecológica y sostenible

Una casa de bóveda nubiana sólo usa materiales brutos disponibles en el entorno: sin planchas metálicas, cemento, acero, ni vigas. Con una huella de carbono muy baja, también tiene la ventaja de que ninguno de sus materiales necesitan ser manufacturados o transportados largas distancias, ni ningún árbol talado para su fabricación.

-Sin madera: 1 bóveda nubiana salva 4 árboles

- 1 bóveda nubiana ahorra 2 toneladas de CO₂

Asequible

Las casas construidas con la técnica de la bóveda nubiana pueden costar la mitad del precio que aquellas construidas con ladrillos u hormigón y tejados de plancha metálica, haciéndola asequibles para familias con pequeños presupuesto.

Duradera

Una casa con bóveda nubiana adecuadamente mantenida puede durar 50 años o más, en comparación con el promedio de 10 años de vida de las paredes de bloques de hormigón y techos de plancha metálica.

Sólida e ignífuga

Los muros gruesos y los techados resistentes proporcionan solidez y casas ignífugas muy eficientes en comparación a las tradicionales con techo de paja, que pueden quemarse fácilmente.

Preserva la cultura y estética locales

Infinitamente más atractiva que las casas de techo metálico, incorpora prácticas tradicionales y estética de arquitectura de tierra, como la arquitectura de tierra de la terraza de un edificio.

Encantos diversos

La decoración, el espacio, la luz, las cualidades acústicas... son todas ventajas que facilitan el confort.

Seguridad

Al contrario de los techos con chapa metálica, ni el viento ni los ladrones pueden llevarse el techo.

Cuida la cultura local y estética

El programa "Nubian Vault" está basado en el rápido entrenamiento de los aprendices y en el uso de materias primas locales. Estos, crean trabajo y estimulan mercados y economías locales.

Crea trabajo y economías locales

Varios programas de bóveda nubiana se basan en el rápido entrenamiento de aprendices y en el uso de materiales locales. Éstos crean trabajos y estimulan mercados y economías locales.

Permite que el aire caliente ascienda más alto y circule

La forma de la bóveda permite una mayor superficie de circulación del aire, sin que éste choque con una superficie plana, y a su vez permite que el aire ascienda más alto, refrescando más el resto de la vivienda.

Menor exposición a los rayos solares

Su curvatura le permite mantener prácticamente todo el día una zona sombreada y por tanto con menor incidencia de los rayos solares.

6.1.2. Algunas desventajas

- Pueden producirse efectos acústicos no deseados, aunque pueden ser subsanados.
- Las bóvedas y cúpulas de tierra requieren mantenimiento y cuidados en la superficie exterior para protegerlas de agua.
- Los gastos económicos que supondría llevar a cabo los cambios (sobre todo los árboles y arbustos). Sin embargo, si tenemos en cuenta el ahorro que supone en gastos eléctricos, y beneficios en la salud, compensa.

6.2. Líneas futuras

6.2.1. El mucílago de nopal o savia de penca como impermeabilizante

Especialmente en los últimos años, los campamentos de refugiados se han visto arrasados y destruidos por las lluvias torrenciales, puntuales pero devastadoras; especialmente las casas de adobe, dada su composición.

Como esta investigación pretende tener aplicaciones reales en este terreno y la investigación continuará con líneas futuras, uno de los retos es conseguir impermeabilizar las viviendas de modo que puedan resistir las lluvias torrenciales en invierno.



Figura 6.1: *Nopal*

En un primer sondeo de investigación he encontrado muy interesante el uso que se hace en México y América latina de la savia de las chumberas, pencas o nopales como impermeabilizante para el adobe al mezclarla con cal viva. Me resulta muy interesante porque se trata de un impermeabilizante ecológico, que podría plantarse en los campamentos, dada su resistencia y que no supondría gastos elevados para su obtención. Veamos a continuación un artículo: “El nopal y su contribución a la sustentabilidad en las edificaciones”³ para comprender mejor sus propiedades y más abajo la sencilla fabricación del cobertor impermeabilizante.

“El uso del mucílago de nopal en morteros de cal puede tener no sólo un impacto social positivo, sino también ambiental, proporcionando un valor agregado a la producción de esta planta, que mejoraría su rentabilidad y contribuiría a la utilización de impermeabilizantes naturales de bajo costo”.

El nopal es una planta perteneciente a la familia de las cactáceas (cactus), constituye un alimento de consumo en México. Esta planta carnosa con espinas, cuyo fruto es la tuna, contiene en su composición fibra dietética, goma, pectina, calcio, mucílago, vitaminas (A, B1, B2, B3), beta-caroteno y proteínas. Además de sus propiedades alimenticias y medicinales, también tiene múltiples usos en la agricultura. A los usos tradicionales del nopal y sus derivados, además de su valor nutricional, se suma su aprovechamiento en rubros tan ajenos a los anteriores, como el de la construcción debido a sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivas y como infiltradores de suelo entre otros.

El nopal en México es clave de nuestro paisaje, de la alimentación y hasta de nuestras creencias, se ha cosechado, usado y admirado. Es un símbolo, ha sido considerado una deidad, ha estado presente en ritos y en mitos, en la historia, en la pintura, la literatura y la ciencia. Es parte de la leyenda fundadora de México, como lo menciona el escritor mexicano Alberto Ruy Sánchez Lacy en su editorial del número 59 de la revista *Artes de México*, quien dedicó una edición al nopal.

El mucílago o baba de nopal es una tecnología prehispánica gracias a la cual perduran complejos arquitectónicos mayas, aztecas y toltecas. Actualmente está en la mira de los científicos, particularmente en el uso en la construcción. Sin embargo, esto no es reciente, como se mencionó, la baba de nopal ha sido empleada desde tiempos prehispánicos en México y en siglos más cercanos para la elaboración de morteros de cal para restaurar y proteger edificios de valor patrimonial.

En México hay una historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal apagada¹: se conoce que aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al

³ <http://www.acontragolpe.com.mx/096s05.php>

agua. Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en paredes de adobe y de ladrillo; también como una barrera al agua en el estuco.

Ambos sistemas constructivos han sido sustentables en la edificación.

En el año 2010, se publicó una investigación realizada por el Dr. Ing. César Eduardo Celis Martínez, de la Universidad Marista de Querétaro A.C., con el objetivo de analizar las propiedades físicas y mecánicas de materiales a base de cemento con adiciones botánicas tales como el nopal y la sábila que son agregados de forma deshidratada con el propósito de determinar si estas adiciones modifican favorablemente los materiales al incluirse como aditivos en el cemento Pórtland; parte de la investigación demuestra que: *“La baba del nopal se puede agregar como adherente orgánico para evitar que los morteros se sequen demasiado rápido, y ayuden a retener la humedad que la mezcla necesita para fijar correctamente, transportando el CO₂ de la atmósfera que combinado con la cal, forma una piedra caliza artificial. Así mismo se estudia la acción anticorrosiva del mucílago, y también se realizan estudios acerca de la utilidad que prestan las pencas como adherentes de pinturas y clarificantes de agua”*.

Actualmente especialistas del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIIDIR) Unidad Oaxaca, del Instituto Politécnico Nacional, trabajan en métodos alternativos para mejorar el proceso de extracción y preservación del mucílago para la eventual industrialización.

A partir de la baba del nopal, se puede fabricar pintura que hace las veces de impermeabilizante, el cual puede ser aplicado a cualquier construcción con tierra, cemento u otros materiales, para protegerla. En el caso de aplicarse a casas de adobe, tierra compactada, este impermeabilizante natural protege la construcción de: el frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos, entre otros. Otras investigaciones han demostrado que el mucílago de nopal actúa como agente modificador de viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del hormigón auto consolidable, además de incrementar la resistencia a la compresión y reducir la absorción capilar de agua.

En el año 2014 la Asociación Civil Horizontes de Arquitectura entregó a la Secretaría de Turismo y Desarrollo Económico del Gobierno del Estado, proyectos para el “Impulso Integral para elevar la competitividad de la industria del Mezcal en el estado de Oaxaca”, con los que se busca beneficiar a treinta productores de mezcal artesanal. Para difundir los *Caminos del Mezcal*, dentro de las propuestas, se priorizó el uso de materiales naturales amigables con el ambiente para fachadas e interiores de los palenques productores, la aplicación de pinturas naturales a base de tierra de la zona y cal con color integrado, así como la impermeabilización de teja artesanal en las techumbres, muros de adobe, de ladrillo aparente, aplanados de cal y pisos de ladrillo, impermeabilizados con baba de nopal.

* Catedrático de las Facultades de Arquitectura y Administración de la Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca. Miembro del Seminario de Cultura Mexicana Corresponsalía Oaxaca, Presidente de Horizontes de Arquitectura A.C. y Director de la revista Horizontes de Arquitectura www.horizontes18.com horizontes18@gmail.com

1 El apagado de cal viva es un procedimiento constructivo ancestral, las piedras de cal se sumergen en agua. Al hidratar la cal se produce una reacción química que alcanza temperatura hasta de 90°C lo que convierte en cáustica, cuando se reposa y se enfría la pasta resultante se puede utilizar como pintura o aplanados. Cuanto más tiempo repose la cal es mejor. Para utilizarla en acabados finos es conveniente que sea de 3 a 6 meses como mínimo

Composición

Para preparar una cubeta (6-7 litros) de este impermeabilizante (que además sirve como pintura de exteriores y como repelente de plagas rastreras en los árboles) necesitas de los siguientes ingredientes:

- 4 litros de agua
- 1 Kg. de cal viva
- 4 nopales
- 1 taza de sal

De preferencia usa guantes porque los productos que vas a utilizar te pueden pelar las manos, por no decir las espinas de los nopales que son bastante dolorosas. La forma de preparar el compuesto es la siguiente:

- En una cubeta picas los nopales finamente y agregas 2 litros de agua.
- Dejas reposar de 10 a 12 horas para que los trozos suelten la baba.
- Una vez pasado el tiempo, machacas los trozos para que suelten lo que les queda de baba; cueles la mezcla y eliminas los residuos sólidos.
- En otra cubeta, mezclas bien los otros 2 litros de agua, la cal y la sal.
- Mezclas todo (con cuidado porque al mezclarlos se genera una reacción química que calienta el compuesto y te puedes quemar).
- Dejas reposar otras 10-12 horas para utilizar el producto resultante.
- Aplicas el producto (de preferencia con una brocha).

6.2.2. Chimeneas solares

Otra de las investigaciones para líneas futuras en la que me gustaría profundizar son las chimeneas solares.

Estas redundarían en una mejora de la circulación del aire por convección pero con temperaturas de circulación más extremas, y por tanto con corrientes de aire fresco mayores. Ésta chimenea funciona así:

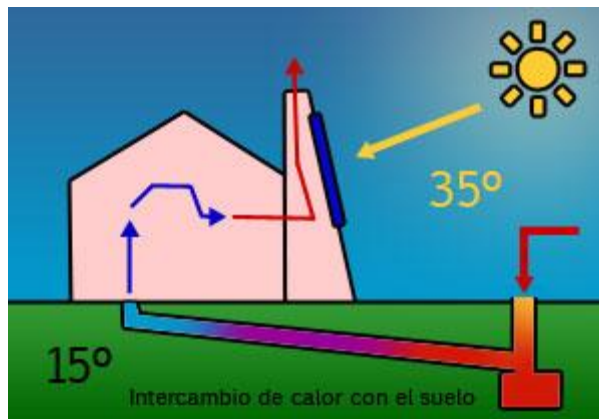


Figura: *Chimenea solar*

La chimenea solar amplifica los fenómenos diferenciales de temperatura, densidad y presión, permitiendo que el flujo y la velocidad de la columna de aire se incrementen proporcionalmente al diferencial de gradientes. Para incrementar la temperatura del aire al interior de la chimenea se aplica el fenómeno del efecto invernadero, captar la máxima radiación solar posible a través de un acristalamiento en función de absorber esta energía en una superficie oscura y posteriormente transformarla en calor, este calor será transmitido al aire interior por efectos convectivos, al aumentar gradualmente su temperatura en el recorrido del tiro de la chimenea irá disminuyendo su densidad y progresivamente aumentando su desplazamiento a capas superiores. El siguiente factor que afecta el flujo de aire es la distancia entre la abertura de salida superior y la de entrada inferior, a mayor distancia de su Nivel Neutral de Presión los gradientes de temperatura y presión serán mayores provocando caudales de salida y entrada más altos.

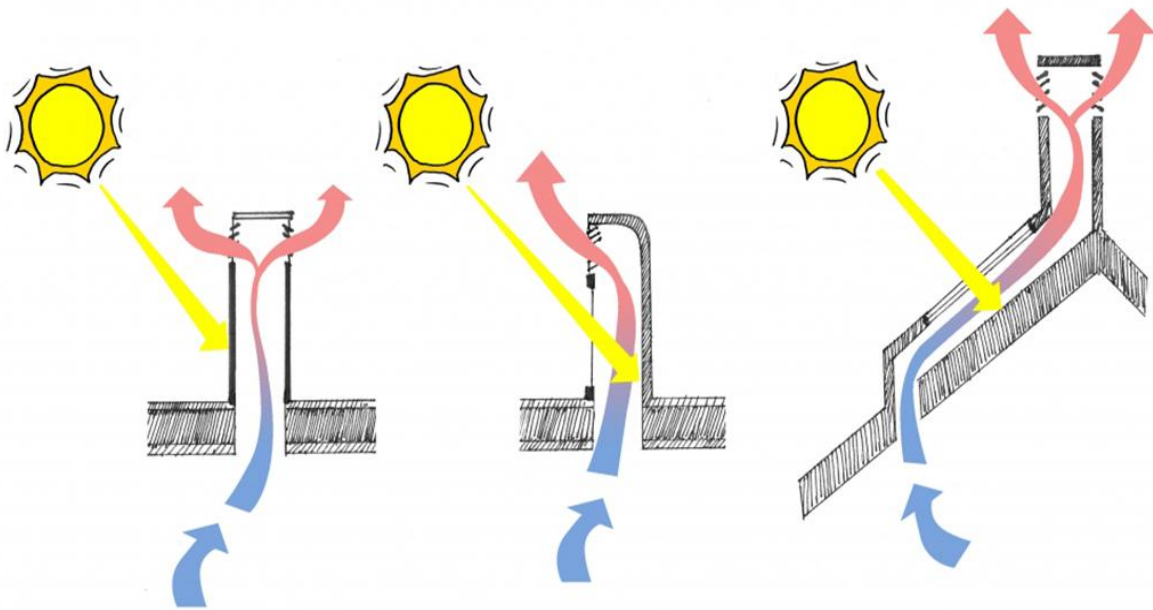


Figura 6.3: *Interior chimenea solar*

La Chimenea Solar es por tanto, un sistema pasivo generador de movimiento de aire, siendo su motor principal la radiación solar; fundamentalmente es una torre vertical hueca con una columna de aire fluyendo hacia el exterior por su extremo superior; al estar adosada a una habitación por medio de un hueco inferior el aire interior de la habitación reemplaza al de la chimenea generando este movimiento de aire; y de manera sucesiva por medio de un hueco en el extremo opuesto de la habitación el aire exterior penetra dentro de la habitación, generando un flujo de aire a través de estos volúmenes. Este sistema de ventilación se origina en el esquema de ventilación cruzada.

Bibliografía

- A. Bouchair, H. Tebbouche, A. Hammouni, M.C Lehtihet, M. Blibli. “Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria”. Mediterranean Green Energy Forum (MGEF-13) [en línea], 2013 .p. 493 – 502.[Consulta: 30 octubre 2015]. Disponible en:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213017529>>
- Arch. FABIO GATTI. ARQUITECTURA y CONSTRUCCIÓN en TIERRA Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra . Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona .2012
- Arquitectos sin frontera. INTERVENCIONES EN EL HÁBITAT CAMPAMENTOS DE REFUGIADOS SAHARAUIS DE TINDOUF.la agencia de la ONU para los refugiados,2009.
- Athena Swentzen; Bill Steen ;David Bainbridge. La Casa de Fardos de Paja. Centro de Permacultura y Experimentación Holística.CHEL SEA GREEN PUBLISHING COMPANY.1991.
- Ayman G. Abdel Tawab.” The World Heritage Centre’s approaches to the conservation of New Gournia Village,and the assessment of its authenticity and integrity”. Alexandria Engineering Journal [en línea], 2014 .p. 691–704.[Consulta: 15 septiembre 2015].Disponible en:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016814000428>>
- Bruno JARNO. PROJET PILOTE DE CONSTRUCTION ET DE DIFFUSION DE SILOS DE CONSERVATION DE L'OIGNON AVEC LA TECHNIQUE VOÛTE NUBIENNE ;Association Voûte Nubienne ; Groupe de collaboration i nternationale en ingénierie de l’Université de Sherbrooke.2013.
- Dr. Lestuzzi Pierino EPFL-ENAC-IS-IMAC. Voûtes nubiennes II Au BurkinaFaso. Projet de semestre de 1e année Master. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (epfl),2007.
- Gernot Minke ,La tierra como manual de construcción y su aplicación en arquitectura actual primera edición.1ª ed .editorial fin de siglo.2001.

- Gernot Minke .Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra. 1ª ed.Universidad de Kassel, Alemania. 2001.
- Hassan fathy .Architectur for the poor
- r 2ª ed. Chicago: University Of Chicago Press.2000.
- M.R. Yaiche, S.M.A. Bekkouche, A. Bouhanik, A. Malek, T. Benouaz.” Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration”. Energy Conversion and Management [en línea], 2014 .p. 114–123.[Consulta: 20 julio 2015]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414001824>>
- Martínez Fernández, Raquel “sistemas económicos de techado con bóvedas de fabrica: bóveda Nubia y bóveda recargada mexicana”. En: construcción con tierra .tecnología y arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en cuenca de campos2010/2011. .[en línea].Valladolid: catedral juan de Villanueva.2011 .p.89–110.disponible en internet :< <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones.html> >
- Matthieu Beth.Module Maçonnerie.france,2007.
- Quoc-Bao Bui, Jean-Claude Morel.”Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering”. Building and Environment[en línea], 2009 .p.912–919 .[Consulta: 12 junio 2015]. Disponible en: <<http://www.researchgate.net/publication/222057718>>
- Santiago Huerta. Arcos, bóvedas y cúpulas Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. INSTITUTO JUAN DE HERRERA Escuela Técnica Superior de Arquitectura Madrid,2004.
- Shanshan Tong,Hua Li, Kishor T.Zingre, Man Pun Wan,Victor W.-C. Chang, Swee Khian Wong, Winston Boo Thian Toh,Irene Yen Leng Lee.” Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate” Energy and Buildings.[en línea], 2014 .p.392–401.[Consulta: 27 noviembre 2015]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814002126>>
- Sherin H. Sameh.” Promoting earth architecture as a sustainable constructiontechniquein Egypt”. Journal of Cleaner Production [en línea], 2014 .p. 362-373.[Consulta: 1 agosto 2015]. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613006033>>

- Urs Wyss, Ing. Civ. Dipl. Epfl. Projet Dissemination des techniques de construction de toitures economiques et non consommatrices de bois au burkina faso. Burkina faso,2005.

Anexos

El anexo correspondiente al apartado de la temperatura y que contiene datos más pormenorizados del clima en los campamentos de refugiados saharauis está adjunto en un Excel a la Memoria del Trabajo de Fin de Máster.

El anexo correspondiente a los datos del FreeFem también se adjunta junto al resto de documentos para un estudio más pormenorizado de su programación.