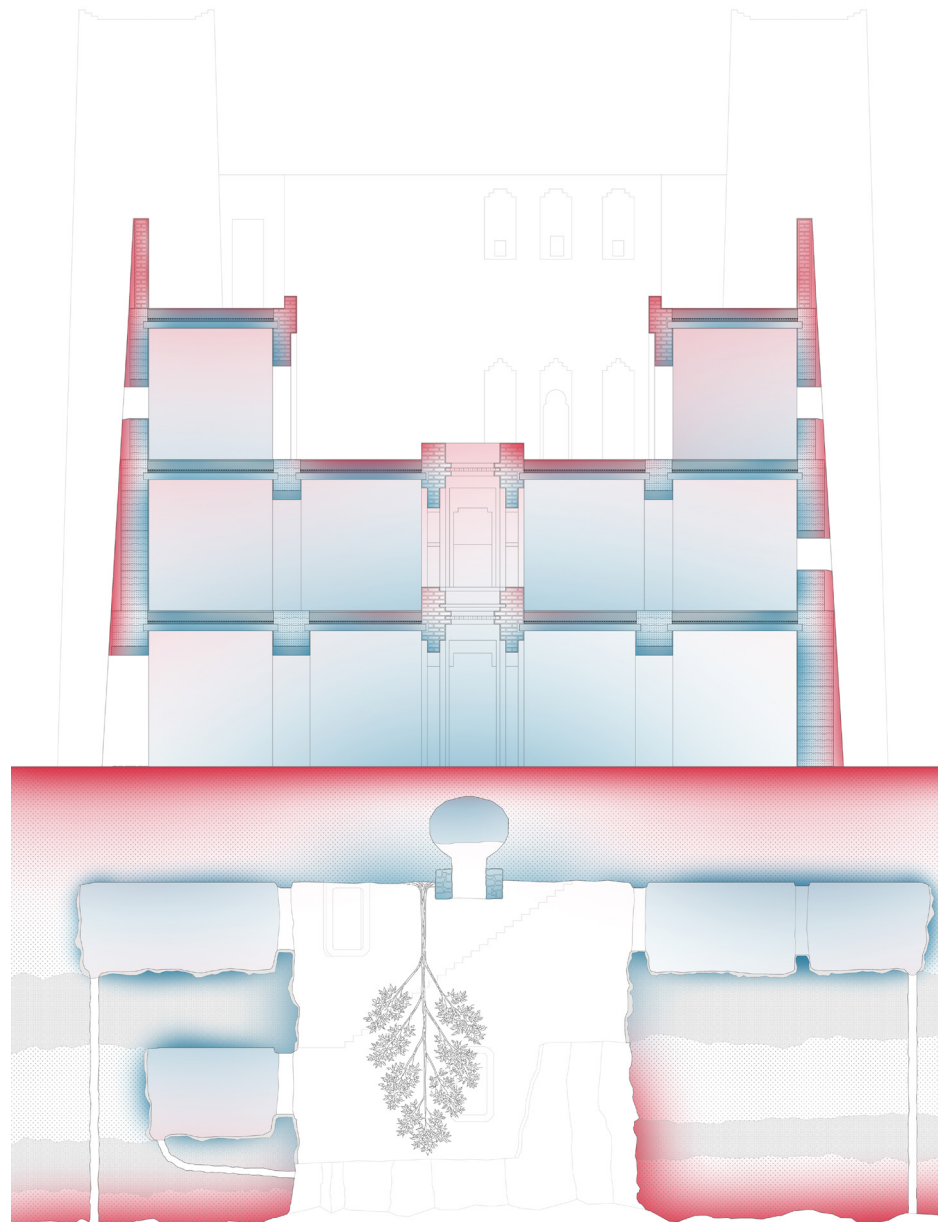


Álvaro Martínez-Ortiz Villanueva

Estrategias Bioclimáticas Asentamientos del pueblo bereber



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Álvaro Martínez-Ortiz Villanueva

*Estrategias Bioclimáticas.
Asentamientos del pueblo bereber*

ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS
ASENTAMIENTOS DEL PUEBLO BEREBER

Estudiante

Álvaro Martínez-Ortiz Villanueva
Expediente 19246

Tutor

Javier García-Germán Trujeda
Departamento de Proyectos

Aula TFG 6

Eduardo Pesquera González, *coordinador*
Giuseppe la Ferla, *adjunto*

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Universidad Politécnica de Madrid

Índice

RESUMEN

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Arquitectura bioclimática: principios y relación con la arquitectura vernácula
- 1.2. Arquitectura y cuerpo humano
- 1.3. Climas áridos y semiáridos: características y desafíos

2. CASO DE ESTUDIO. ARQUITECTURA BEREBER EN MATMATA Y EL SUR DE MARRUECOS

- 2.1. Descripción arquitectónica y constructiva
- 2.2. Vestimenta bereber
- 2.3. Análisis climático

3. ANÁLISIS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA

- 3.1. Modelo de condiciones higrotérmica verano/invierno
- 3.2. Análisis y representación gráfica de las estrategias bioclimáticas
- 3.3. Comparación de eficiencia bioclimática entre los casos

CONCLUSIONES

FUENTES

- Bibliografía y recursos digitales
- Procedencia de las ilustraciones

Resumen

Este Trabajo Fin de Grado se centra en estudiar las herramientas bioclimáticas aplicadas tradicionalmente en asentamientos bereberes situados en zonas áridas cálidas (BWh según el plano de Köppen-Geiger), concretamente, de las viviendas excavadas de Matmata, en Túnez, y las kasbahs del sur de Marruecos. El objetivo principal es entender cómo este pueblo, desde hace siglos, ha conseguido adaptar su arquitectura al clima extremo al que se enfrenta, generando confort de manera pasiva, sin depender de sistemas de control activos.

El estudio comienza con un análisis arquitectónico, cultural, y climático, que posteriormente se relacionan entre ellos para extraer y entender las estrategias bioclimáticas utilizadas, así como cartografiarlas de manera detallada para el entendimiento propio y del lector.

Finalmente, frente al actual contexto de cambio climático, el trabajo extrae aprendizajes útiles para la arquitectura contemporánea, destacando la importancia de reinterpretar las soluciones tradicionales del pueblo bereber en un contexto actual de manera sostenible.

PALABRAS CLAVE

Arquitectura bioclimática · Estrategias vernáculas · Confort térmico · Asentamientos bereberes · Adaptación climática · Tapial

Introducción

Planteamiento del problema

Debido al cambio climático, se estima que para el año 2050, algunas zonas de España podrían pasar de su típico clima mediterráneo a un clima estepario semiárido, lo que conlleva un ambiente más cálido y seco, y un descenso de las precipitaciones de entre el 14 y 20%¹. Un clima más parecido al que se da en el norte de África.

Ante este escenario, resulta necesario comenzar a replantearse ciertos aspectos de la arquitectura, sobre todo, en lo que respecta a las estrategias pasivas que deberíamos adoptar para adaptarnos a las nuevas condiciones. Estrategias, a ser posible, que tengan una baja huella de carbono y un metabolismo circular, para hacer los edificios lo más sostenibles posible, y que no contribuyan a agravar el problema del cambio climático.

Philippe Rahm reconoce la importancia de identificar las estrategias empleadas en la arquitectura tradicional para aplicarlas a la arquitectura contemporánea, de manera sostenible y con tecnología actual.

“La utilización en la construcción de parámetros ligados al desarrollo sostenible no debe limitarse a una cuestión técnica. Estos parámetros deben posibilitar la generación de nuevas formas y nuevos modos de habitar. Cada periodo histórico, así como cada región climática y geográfica, han generado tipos constructivos y técnicas específicas que han modificado la forma de pensar la vivienda, sus relaciones con el exterior y su distribución interior, sugiriéndose de esta forma nuevos comportamientos espaciales”, Philippe Rahm.²

Estado de la cuestión

Desde mediados del siglo XX ha existido cierto interés por la arquitectura vernácula desde una perspectiva histórico-cultural. Algunos arquitectos que trataron sobre la materia son Bernard Rudofsky, Sibyl Moholy, Amos Rapoport y Paul Oliver.

Pero no ha sido hasta el siglo XXI, que se ha empezado a tratar sobre el tema desde otra perspectiva, la bioclimática. Arquitectos como Víctor Olgay, F. Javier Neira y Philippe Rahm le han dedicado libros a estudiar sobre la relación entre la arquitectura, el clima y el cuerpo humano.

Sin embargo, los ejemplos de arquitectura vernácula no suelen estar cartografiados detalladamente, y se suelen estudiar usando las características generales de los climas a los que pertenecen como base.

1. Berta Erill Soto. “España podría afrontar un clima árido para 2050, según un nuevo estudio”. National Geographic, 25 de septiembre de 2024.

2. Philippe Rahm. Arquitectura inmediata. Boletín CF+S, no 38/39 (2006): 153.

Objetivo del estudio

Estudiar y evaluar la eficiencia de las estrategias bioclimáticas empleadas por el pueblo bereber en algunos de sus asentamientos tradicionales al borde del desierto. Con el objetivo de cartografiar de manera detallada su comportamiento y herramientas termodinámicas, teniendo en cuenta su forma, la técnica constructiva, la manera de habitar y las condiciones climáticas específicas de los casos escogidos.

Y también, con la intención de concluir con una breve comparación con técnicas contemporáneas, que repliquen de manera directa o parecida las estrategias detectadas en la arquitectura bereber, para poder aplicarlas en futuros proyectos.

Analizar las estrategias empleadas en la arquitectura tradicional de algunos asentamientos del pueblo bereber, para generar confort en un clima, como el que podríamos encontrar en España dentro de unos años.

Dibujar sobre algunas secciones representativas, el comportamiento termodinámico de los casos elegidos. Para diferentes momentos del año (verano/invierno) y del día (día/noche).

Metodología y herramientas utilizadas

Siguiendo la línea de investigación contemporánea, se busca analizar los casos seleccionados relacionando la arquitectura con el clima cálido árido (BWh) y con el cuerpo humano.

Mediante un estudio de casos relacionados en clima y cultura, y un análisis detallado del clima en cada ubicación con la ayuda del programa Climate Consultant.

Siguiendo las descripciones de libros, así como planos esquemáticos y dibujos de referencia, se han hecho planos representativos de los casos usando herramientas gráficas digitales, y se ha representado sobre ellos el comportamiento termodinámico para diferentes momentos del año (verano/invierno) y del día (día/noche), haciendo hincapié en el momento más desfavorable para el tipo climático elegido, los días de verano.

1 Marco teórico

1.1. Arquitectura bioclimática: principios y relación con la arquitectura vernácula

Desde siempre, la arquitectura ha tenido como objetivo principal mantener al cuerpo humano dentro de su zona de confort térmico, normalmente situada entre los 21 y 28°C y con una humedad relativa del aire que oscila entre el 30 y el 70%. Para conseguirlo, se crea una especie de envolvente artificial que regula estas condiciones alrededor del ser humano.

Sin embargo, en el siglo XX, la llegada de sistemas mecánicos de regulación térmica (herramientas activas) hizo que la arquitectura dejara de lado el diseño climático, centrándose principalmente en aspectos estéticos y formales. Ahora, en pleno siglo XXI y con una creciente preocupación por el cambio climático, sumado al hecho de que el sector de la construcción representa un 38% de las emisiones mundiales de CO₂ ³, se busca recuperar una arquitectura donde los criterios de diseño estén basados en el clima y en reducir el impacto ambiental mediante estrategias pasivas. Esto es lo que llamamos arquitectura bioclimática.

Según la Real Academia Española, el término “bioclimático” hace referencia a la interacción que existe entre los seres vivos y el clima o las condiciones ambientales que los rodean ⁴. Así, podemos entender que la arquitectura bioclimática es aquella que intenta mantener al cuerpo humano dentro de su confort térmico, adaptándose directamente a las condiciones ambientales del lugar.

Antes del siglo XX, la arquitectura tradicional ya lograba un confort térmico adecuado mediante herramientas de diseño pasivas y sostenibles, como patios, muros gruesos o sistemas de ventilación natural. Por esto, rescatar estos métodos tradicionales, no debe verse como un simple gesto nostálgico, sino como una oportunidad valiosa, un laboratorio que ofrece soluciones pasivas que hoy podrían industrializarse de manera eficiente, considerando tanto la sostenibilidad como el confort sensorial del ser humano.

1.2. Arquitectura y cuerpo humano

El cuerpo humano necesita mantener una temperatura interna estable de alrededor de 37°C, un estado conocido como *homeotermia*. Para lograrlo, cuenta con diversos mecanismos que le permiten conservar o liberar calor según las condiciones del entorno. Victor Olgyay definió la zona de confort como el conjunto de condiciones ambientales en las que el ser humano puede mantenerse sin realizar un esfuerzo térmico significativo, es decir, sin gastar energía extra para calentarse o enfriarse ⁵. Claro que este rango

3. Rahm, Philippe. *Climatic Architecture*. (New York: Actar Publishers, 2023)

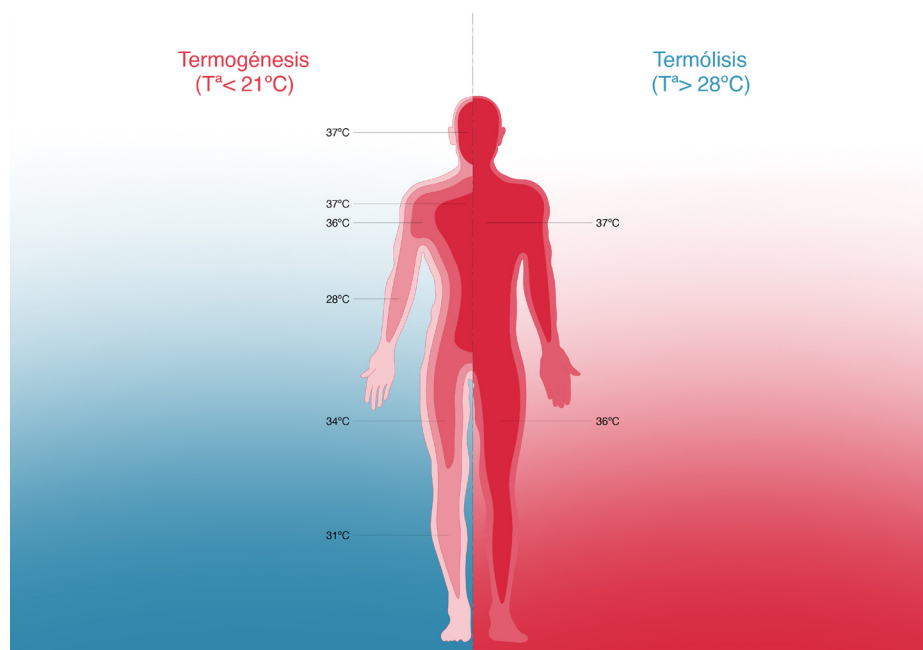
4. Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed. Madrid: RAE, 2014, s.v. “bioclimático”

5. Olgyay, Victor. *Arquitectura y clima...* (Barcelona: Gustavo Gili, 1998).

no es idéntico para todos: depende de factores como la ropa que llevamos puesta, nuestra edad, o el nivel de actividad física que estamos realizando. Aun así, de manera general, se considera que este confort suele encontrarse entre los 21 y los 28°C.

Varios elementos del entorno influyen en cómo nos sentimos térmicamente: la temperatura del aire, la humedad, la circulación del viento y la radiación solar, entre otros.

El cuerpo cuenta con mecanismos propios (los llamados mecanismos endógenos) para regular su temperatura. Algunos ejemplos son la vasodilatación, que ayuda a disipar el calor; la sudoración, que enfría la piel al evaporarse; o los escalofríos, que generan calor mediante pequeñas contracciones musculares. Estos mecanismos se agrupan según su función: los que ayudan a generar calor (termogénesis) y los que lo disipan (termólisis) ¹. Sin embargo, cuando estas respuestas internas no bastan, las personas recurrimos a mecanismos externos, como usar ropa adecuada, alimentarnos bien o buscar refugio en espacios que nos protejan, ya sea una casa, una cueva o bajo la sombra de un árbol.



1.1. Termoregulación del cuerpo humano (Elaboración propia)

En cuanto al intercambio de calor entre el cuerpo y su entorno, este se produce a través de cuatro vías principales: conducción, convección, radiación y evaporación. Aproximadamente, cada uno representa un porcentaje del total: 5%, 35%, 35% y 25%, respectivamente.

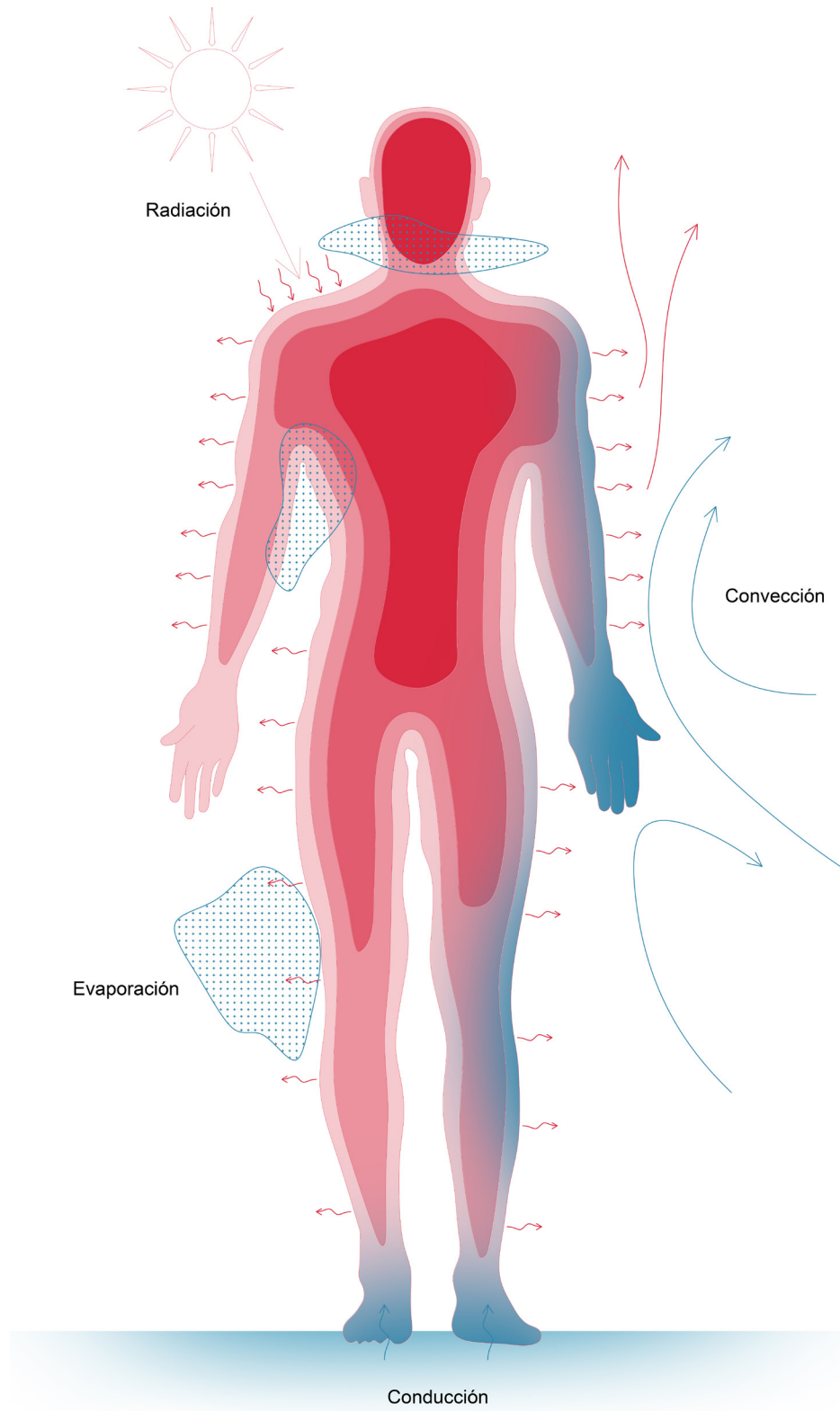
- Conducción: Es el calor que se transfiere por contacto directo entre dos cuerpos con diferente temperatura. Por ejemplo, cuando tocamos una superficie fría con las manos, el calor del cuerpo pasa rápidamente al objeto.

- Convección: Transferencia de calor mediante el movimiento de un fluido, como el aire o el agua. Si estamos al aire libre en un día ventoso, el viento reemplaza el aire caliente que rodea nuestra piel por aire más fresco, ayudándonos a enfriarnos.

- Radiación: Es el calor que emitimos o recibimos en forma de ondas infrarrojas. Nuestro cuerpo irradia calor hacia el entorno, y de la misma manera, puede absorberlo cuando nos encontramos cerca de una pared soleada.

-Evaporación: Ocurre cuando perdemos calor a través del sudor que se evapora. Este proceso ayuda a enfriar la piel y mantenernos frescos, especialmente en climas cálidos.

1.2. Intercambios de calor entre el cuerpo humano y su entorno
(Elaboración propia)



1.3. Climas áridos y semiáridos: características y desafíos

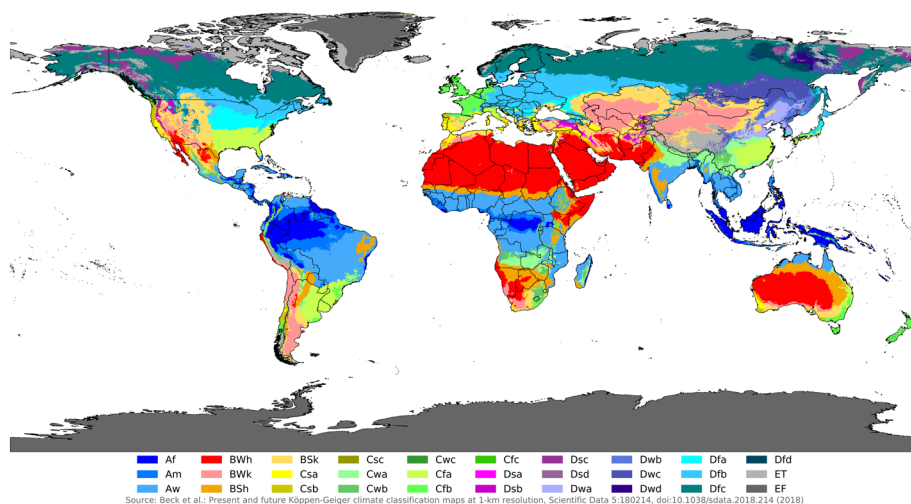
Se ha optado por utilizar la clasificación de Köppen-Geiger, dado que es una de las más empleadas a nivel mundial para describir y categorizar los distintos tipos de clima. Este sistema agrupa los climas en cinco categorías principales: tropicales (grupo A), áridos (grupo B), templados (grupo C), continentales o fríos (grupo D), y polares (grupo E), con subdivisiones basadas en criterios de temperatura y precipitación.

En el presente estudio, el enfoque se centrará en los climas del grupo B, es decir, los climas áridos. Dentro de esta categoría se distinguen dos subtipos: el clima desértico (Bw) y el clima estepario (Bs), que también pueden denominarse árido y semiárido, respectivamente, en función del grado de sequedad y del tipo de vegetación asociada, la cual está directamente condicionada por las precipitaciones.

A su vez, tanto los desérticos como los esteparios se clasifican en cálidos (h) y fríos (k), dependiendo de si la temperatura media anual supera o no los 18°C. En este caso, nos enfocaremos específicamente en los climas áridos o semiáridos cálidos.

Estos climas se caracterizan por inviernos suaves, aunque en regiones interiores las temperaturas nocturnas pueden descender hasta cerca de los 0°C. Los veranos, en cambio, suelen ser muy cálidos, e incluso extremadamente calurosos en determinadas áreas, donde se han registrado algunas de las temperaturas más altas del planeta. Las precipitaciones son escasas durante todo el año, y la vegetación es limitada, predominan especies propias del desierto y de la estepa. Este tipo de clima se localiza habitualmente en franjas subtropicales, como ocurre en los márgenes del desierto del Sahara ⁶.

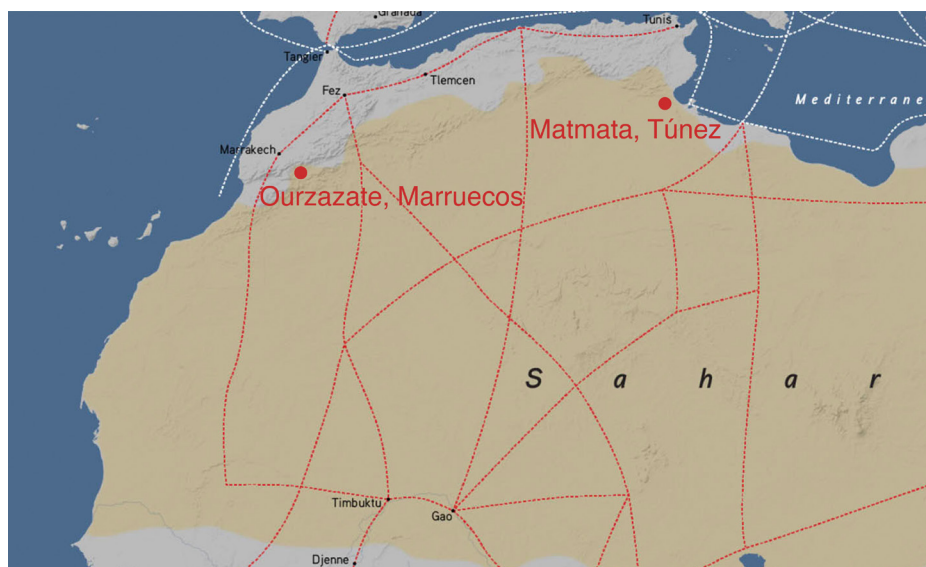
Por tanto, los principales retos que plantea este tipo de clima son la limitada disponibilidad de recursos naturales, especialmente agua y madera, así como las altas temperaturas. Como consecuencia, las poblaciones que habitan estas zonas tienden a asentarse en torno a los ríos y desarrollan diversas estrategias para almacenar y aprovechar al máximo el agua disponible.



1.1. Plano Köppen-Geiger de clasificación climática (1980-2016).

2 Caso de estudio. Arquitectura bereber en Matmata y el sur de Marruecos

Con el objetivo de estudiar las estrategias bioclimáticas propias del clima árido cálido, se han seleccionado dos casos de estudio: las viviendas excavadas de Matmata, en Túnez, y las kasbahs o fortalezas de barro situadas al sur de Marruecos. Aunque ambos ejemplos pertenecen a contextos históricos diferentes, su elección responde al interés de comparar cómo un mismo tipo climático, el árido cálido (BWh), da lugar a soluciones arquitectónicas distintas.



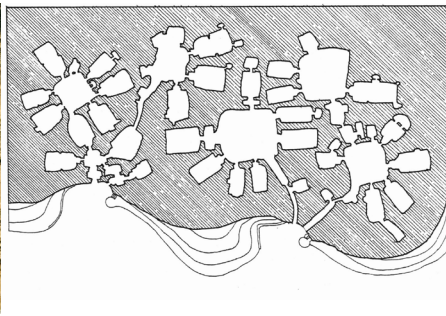
2.1. Mapa de ubicación de los casos

Además, presentan ubicaciones geográficas contrastantes: mientras que las viviendas excavadas de Matmata se encuentran en una zona relativamente cercana a la costa, las kasbahs se ubican en una meseta elevada, entre el Alto Atlas y el desierto del Sahara. A esto se suma que, arquitectónicamente, una se desarrolla bajo tierra y la otra en altura, lo que permite observar enfoques opuestos frente a unas condiciones similares. Esta comparativa nos permite analizar distintas estrategias de adaptación al entorno dentro de un mismo marco climático.

2.1. Descripción arquitectónica y constructiva

Las condiciones climáticas externas, la necesidad de protección frente a los elementos naturales, como el calor extremo y los vientos provenientes del desierto, y frente a posibles ataques enemigos, así como la limitada disponibilidad de materiales, son los detonantes que impulsan en gran medida la arquitectura en las zonas estudiadas.

Viviendas excavadas de Matmata



2.2. (Izquierda) Imagen aérea de agrupación de viviendas excavadas

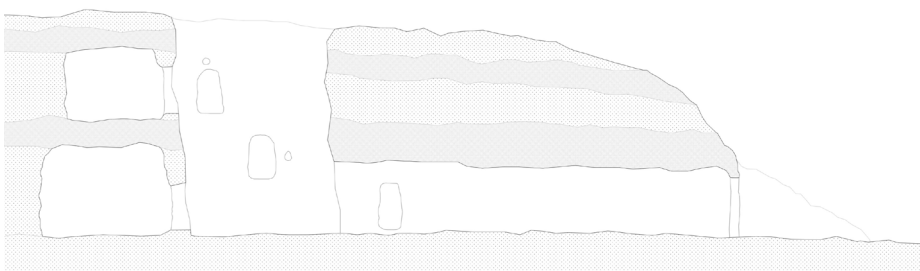
2.3. (Derecha) Planta de agrupación de viviendas excavadas conectadas

Las viviendas excavadas en Matmata, aprovechan estratégicamente la topografía irregular del terreno, situándose preferentemente en las pendientes para facilitar la entrada directa mediante túneles horizontales, evitando así accesos escalonados más complejos, es habitual observar conjuntos de estas viviendas formando pequeñas agrupaciones, algunas de ellas conectadas internamente. Las casas son prácticamente invisibles desde la distancia, lo cual les da una gran ventaja defensiva.



2.4. Ilustración del pozo integrado en el paisaje (Libro de Daniel Brunn)

Estos hogares se articulan alrededor de un patio central de forma generalmente circular o cuadrada, cuyo diámetro suele rondar los 12 metros, alcanzando hasta 15 metros en algunos casos excepcionales ¹. Su profundidad varía entre 5 y 10 metros, e incluye habitualmente elementos como un pozo para recoger agua de lluvia y un árbol de eucalipto, los cuales generan un microclima. El pozo no actúa solamente como acceso y distribuidor, sino también como espacio común para actividades domésticas, iluminación y ventilación.



2.5. Sección de túnel de entrada (Elaboración propia)

7. Neila González, Francisco Javier. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. (Madrid: Editorial Munilla-Lería, 2004)

Las habitaciones, excavadas en torno a este patio, tienen dimensiones aproximadas de entre 4 y 7 metros de longitud, de 3 a 4 metros de ancho y una altura promedio de 2,5 a 3 metros ². El mobiliario interior, como nichos y camas, se obtiene excavando directamente en el terreno, siendo habitual la existencia tanto de viviendas de una sola planta como de dos niveles superpuestos.

2.6. Fotografía desde el interior de un pozo

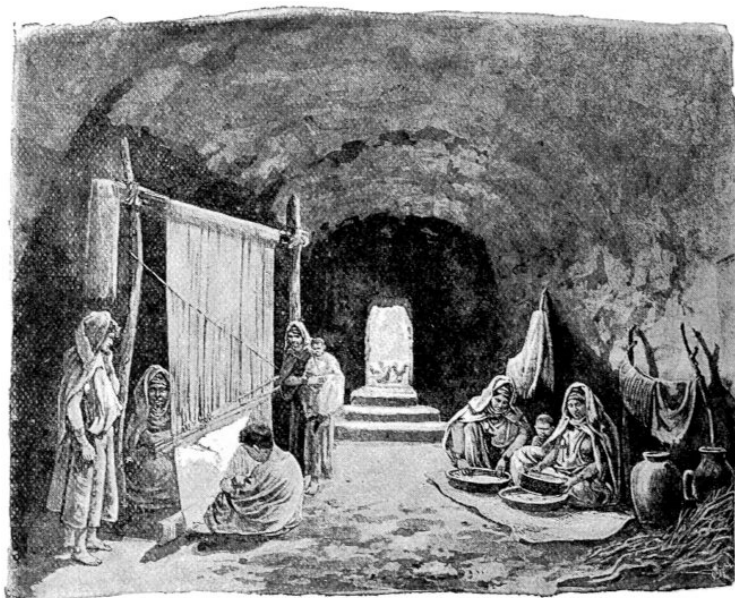


La técnica constructiva empleada es sencilla gracias a la calidad de la roca local, que no requiere estructuras adicionales para sostener los espacios excavados tras su ejecución. Los principales materiales utilizados son la misma roca excavada, junto con cal para revestir, y madera o piedra en casos puntuales y necesarios. La elección del lugar la hacía un experto que evaluaba las condiciones geológicas. El proceso de construcción consta de dos fases claramente definidas: una primera excavación vertical, realizada por expertos hasta alcanzar un estrato blando y estable, compuesto principalmente por arcillas limosas compactas, situado entre dos capas de roca más dura que actúan como forjado superior e inferior de las habitaciones. Posteriormente, se procede con la excavación horizontal para crear las estancias. Por motivos estructurales y para distribuir uniformemente las cargas, estas habitaciones adoptan habitualmente la forma de bóveda de cañón.

2.7. Detalle de proceso de excavación (Elaboración propia)



8. Loubes, J.P. Arquitectura subterránea. Aproximación a un hábitat natural, Colección Tecnología y Arquitectura. (Barcelona: Gustavo Gili, 1985).



Comparativa entre dos imágenes parecidas.

2.8. Ilustración del interior de una habitación excavada (Libro de Daniel Brunn)



2.9. Fotografía del interior de una habitación excavada

2.10. Túnel de entrada con canal de recogida de agua (izquierda).

2.11. Persona bereber en el patio excavado (derecha).



El acabado interior de las paredes se realiza mediante un revestimiento de cal y barro, ayudando así a estabilizar la temperatura interior, proteger ligeramente de la humedad del terreno circundante y proporcionar una superficie lisa.

En las viviendas con un segundo nivel, las escaleras suelen tallarse en la roca lateral del pozo central o, alternativamente, se crean peldaños rudimentarios, a modo de escalones verticales acompañados frecuentemente de cuerdas que facilitan el ascenso. Además del patio central, las habitaciones disponen de pequeños respiraderos verticales, los cuales actualmente podemos observar que se encuentran culminados por una chimenea o protección superior, que eleva el punto de captación de aire fresco y evita la entrada de agua durante las lluvias ocasionales. Aunque no se encuentra información relativa a estas culminaciones en el pasado, podemos suponer que las primeras viviendas excavadas de las zonas tendrían elementos parecidos, más camufladas e integradas con el paisaje.

2.12. Pozo cuadrado

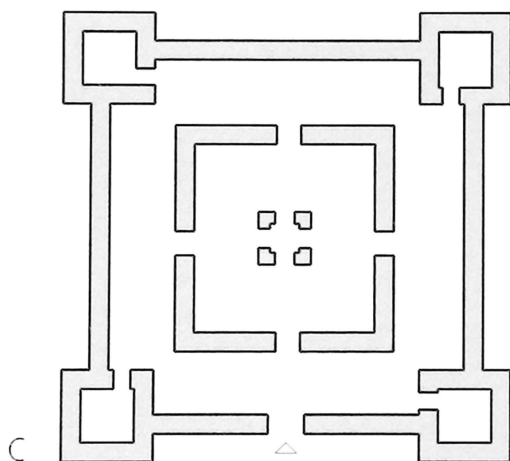


Kasbahs al sur de Marruecos

2.13. *Imagen del Ksar de Ait Ben Hadu (Fotografía de elaboración propia)*

En el sur marroquí predominan asentamientos fortificados conocidos como ksur (plural de ksar), constituidos por agrupaciones de viviendas rodeadas por una muralla perimetral defensiva. Dentro de estos conjuntos encontramos las denominadas kasbahs, viviendas individuales fortificadas, aunque en algunos casos pueden encontrarse aisladas y acompañadas de edificaciones anexas ⁹.

Si bien la tipología de las kasbahs varía según la región concreta, generalmente presentan una planta cuadrada o ligeramente rectangular, con torres situadas en cada esquina que sobresalen ligeramente del volumen principal, alcanzando alturas superiores a las terrazas adyacentes. La altura habitual de estos edificios varía entre tres y cinco plantas.



2.14. *Planta de Kasbah tipo*

9. Mimó, Roger. Fortalezas de barro en el sur de Marruecos. (Madrid: Compañía Literaria, 1996).

En planta se identifica claramente una doble estructura muraria: un primer muro perimetral, grueso y defensivo, seguido interiormente por otro muro concéntrico, formando así la crujía exterior, espacio destinado principalmente a habitaciones. El núcleo central suele organizarse alrededor de un pequeño patio cubierto, delimitado por cuatro pilares cuadrados de adobe que enmarcan un pozo de luz con dimensiones aproximadas de 1 o 2 metros de lado ². La segunda crujía, denominada interior, queda definida por este segundo muro y los pilares interiores.

2.15. Fotografía desde el fondo de un pozo de luz (izquierda).

2.16. Fotografía del pozo de luz desde el patio cubierto (derecha).



La distribución vertical responde claramente a necesidades funcionales. En términos generales la planta baja aloja animales domésticos y sirve como almacén de reservas alimenticias. Las plantas intermedias combinan la cocina, situada estratégicamente cerca del pozo de luz central para facilitar la ventilación y evacuación del humo, con habitaciones destinadas a los miembros mayores del núcleo familiar. Finalmente, la terraza superior se aprovecha para el secado de productos agrícolas como dátiles, y acoge las habitaciones infantiles y las estancias para invitados, generalmente dotadas de aberturas mayores y una decoración más cuidada y elaborada.

2.17. Bereber sirviendo té en el salón de invitados



10. Soriano Alfaro, Vicent. Arquitectura de tierra en el sur de Marruecos: el oasis de Skoura. (Barcelona: Fundación Caja de Arquitectura, 2006).

Sin embargo, el uso de estancias tiene cierta versatilidad con una componente migratoria. En verano, durante el día se usan principalmente las habitaciones del interior por las inclemencias del tiempo, y por la noche se aprovecha la terraza de la cubierta y las habitaciones adyacentes a esta para dormir, mientras que, en invierno, se hace de manera inversa.



2.18. *Patio de cubierta en la kasbah de Amridil*

En cuanto al sistema de comunicación vertical, las escaleras pueden encontrarse indistintamente en ambas crujías, presentando configuraciones variables.

Originalmente las ventanas eran escasas y pequeñas, limitadas a estrechas troneras entre los tramos de tapial. A finales del siglo XIX comenzaron a aparecer ventanas un poco más grandes (alrededor de 50 cm de ancho), equipadas con marcos y contraventanas de madera. Desde mediados del siglo XX se generalizaron ventanas aún mayores, próximas al suelo para favorecer la ventilación y mejorar las vistas.



2.19. *Detalles de fachada en la Kasbah de Ait Abou*

La técnica constructiva predominante para los muros exteriores y las paredes interiores de las crujeías perimetrales es el tapial, con espesores superiores al metro (en algunos casos) en las plantas inferiores, que se reducen progresivamente en altura hasta un mínimo aproximado de 40 centímetros. Esta reducción escalonada hacia el interior genera visualmente un aspecto inclinado desde el exterior, muy característico de estas edificaciones. Las dimensiones habituales del tapial rondan los 80 cm de altura por 2 metros de longitud, con un ancho mínimo ya indicado ⁴. Estos se construían sobre una cimentación muy pobre de piedra que buscaba reducir el ascenso del agua por capilaridad.

2.20. Encofrado de tapial. Fotografía por Jorge Ruiz Nieto.



Para elementos constructivos como columna, ventanas, arcos y detalles decorativos, se emplean tradicionalmente ladrillos de adobe elaborados con barro mezclado con paja, cuyas dimensiones son típicamente de 24 x 10 x 7 centímetros ³.

2.21. Elaboración de ladrillos de adobe.



9. Mimó, Roger. Fortalezas de barro en el sur de Marruecos. (Madrid: Compañía Literaria, 1996).

10. Soriano Alfaro, Vicent. Arquitectura de tierra en el sur de Marruecos: el oasis de Skoura. (Barcelona: Fundación Caja de Arquitectura, 2006).



2.22. Torre dentro de un ksar. Acabado de paja sobre muros. (Elaboración propia)

Los forjados están constituidos por vigas de madera separadas como máximo 50 cm, evitando uniones verticales en el mismo punto del tapial. Sobre estas vigas se coloca un entramado de ramas, cañas, cartones o piedras planas según la resistencia requerida, y una capa final de tierra apisonada de al menos 20 cm de espesor, con pendiente mínima para facilitar la evacuación de agua.

2.23. Vigas de madera (izquierda).

2.24. Vista inferior del forjado con cañizo (izquierda).

Fotografías por Jorge Ruiz Nieto.



Las coronaciones de los muros se protegen mediante elementos como cañas, madera o piedra, sobresaliendo ligeramente del plano vertical para proteger de la lluvia. Una capa final de barro fino con paja prensada cubre las terrazas, brindando impermeabilización.

Finalmente, los revestimientos exteriores requieren mantenimiento frecuente, ya que se realizan con mezclas de barro y paja que, aunque resistentes al agua, se deterioran progresivamente.

Las columnas interiores, de adobe, poseen generalmente secciones cuadradas de aproximadamente 60 x 60 cm y sustentan las galerías que rodean el patio central.

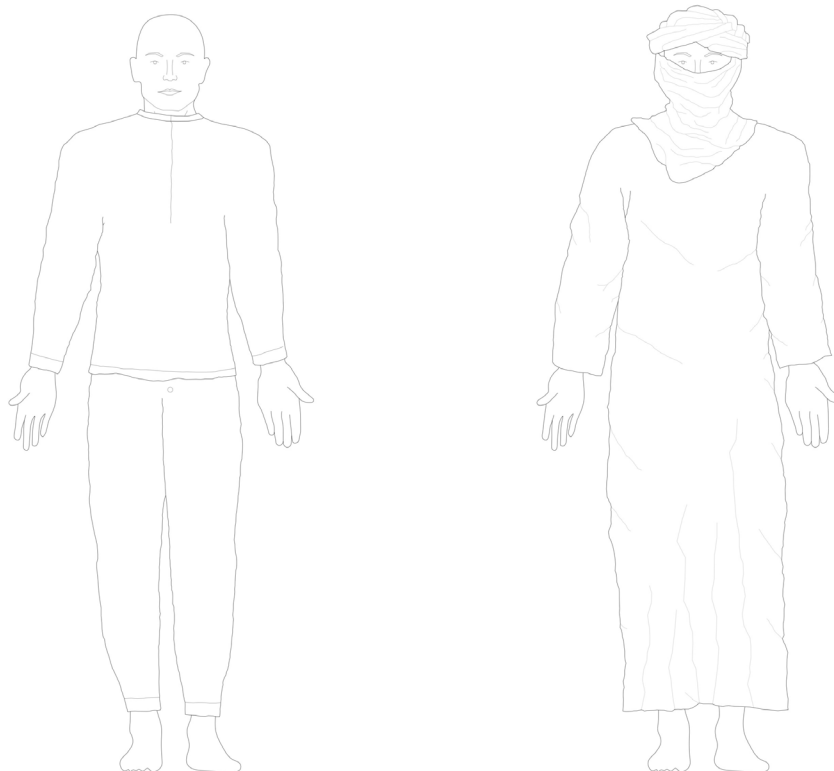
2.2. Vestimenta bereber

En los entornos desérticos, la indumentaria tradicional bereber cumple una función esencial como sistema de regulación térmica. Esta se caracteriza por prendas amplias y sueltas que generan una separación entre el tejido y la piel, creando un colchón de aire que facilita la ventilación. Este flujo de aire, impulsado por la brisa o el movimiento del cuerpo, favorece la evaporación del sudor, contribuyendo a mantener una temperatura corporal más baja que la del ambiente.

Además de permitir esta disipación del calor interno, las prendas (especialmente si están confeccionadas con tejidos claros) actúan como una barrera frente al calor exterior, reflejando la radiación solar y minimizando la transferencia de calor por conducción. Esta estrategia vestimentaria ofrece una doble eficacia: protege del entorno caluroso y favorece el equilibrio térmico corporal.

A diferencia de la cultura occidental, que asocia el confort térmico al alivio inmediato del despojarse de ropa, las sociedades bereberes han desarrollado un enfoque más eficiente y adaptado a su entorno. La sensación de estar “desnudo dentro de la ropa”⁵ que describe Fernando Ramón Moliner en su libro, evidencia que el verdadero frescor no reside en la exposición directa de la piel, sino en el aprovechamiento inteligente de los principios de convección, evaporación y protección solar.

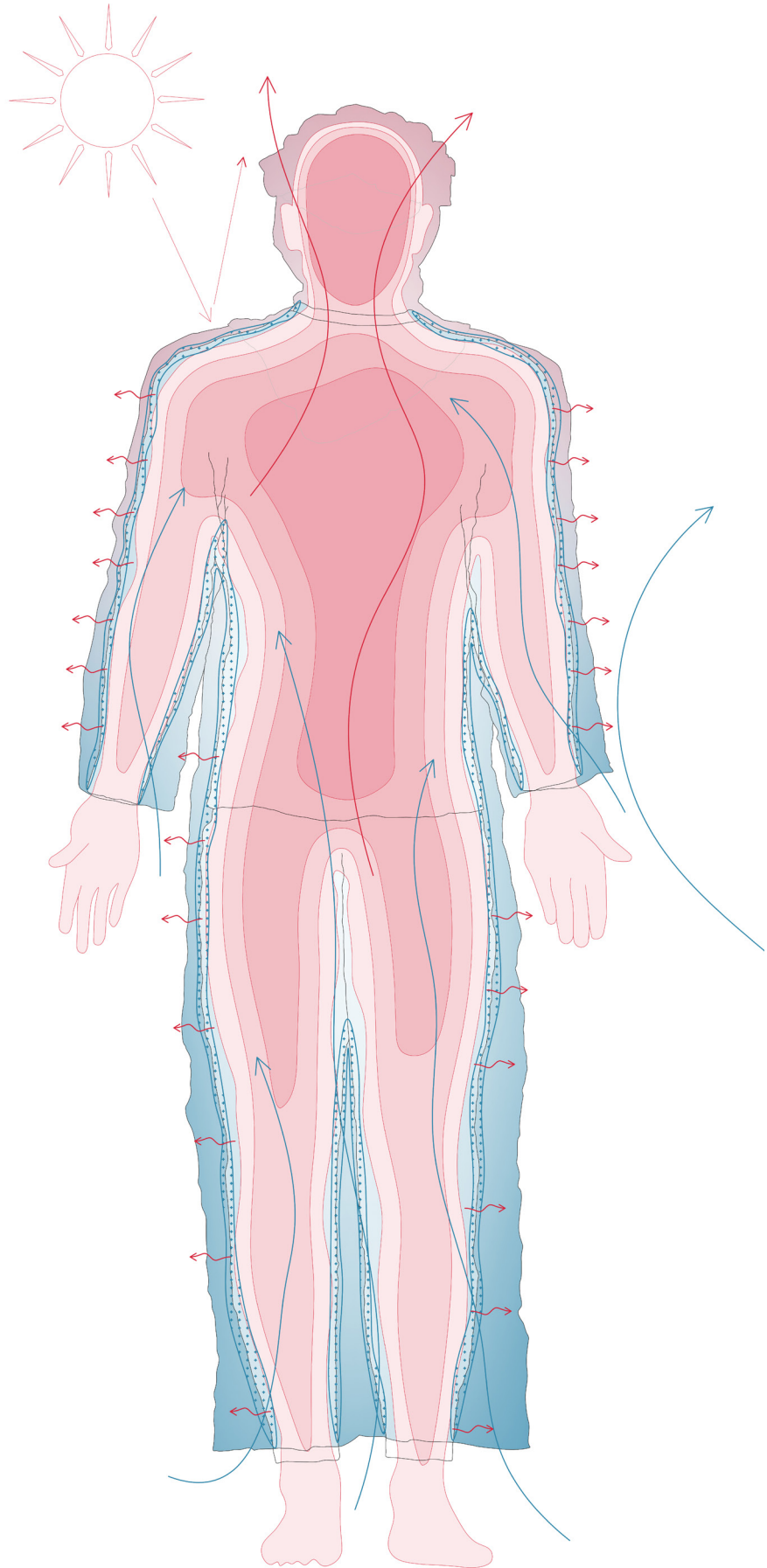
En este sentido, la indumentaria tradicional bereber no es solo una expresión cultural, sino una tecnología climática pasiva que encarna un conocimiento vernáculo profundamente adaptado a las condiciones extremas del desierto.



2.25. Capas de la ropa tradicional bereber. Capa interior (izquierda) y capa exterior (derecha). (Elaboración propia)

12. Ramón, Moliner. Ropa, sudor y arquitectura. (Madrid: Hermann Blume, 1980), 16

2.26. Comportamiento termodinámico de la ropa tradicional bereber.
(Elaboración propia)

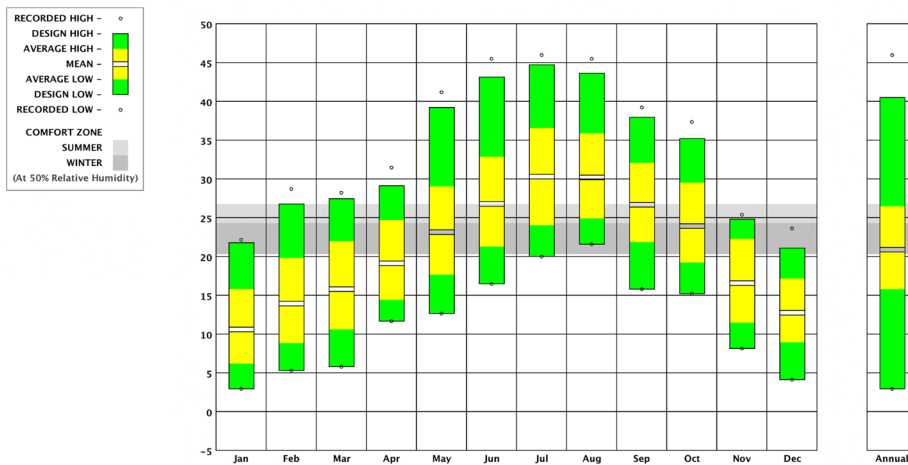


2.3. Análisis climático

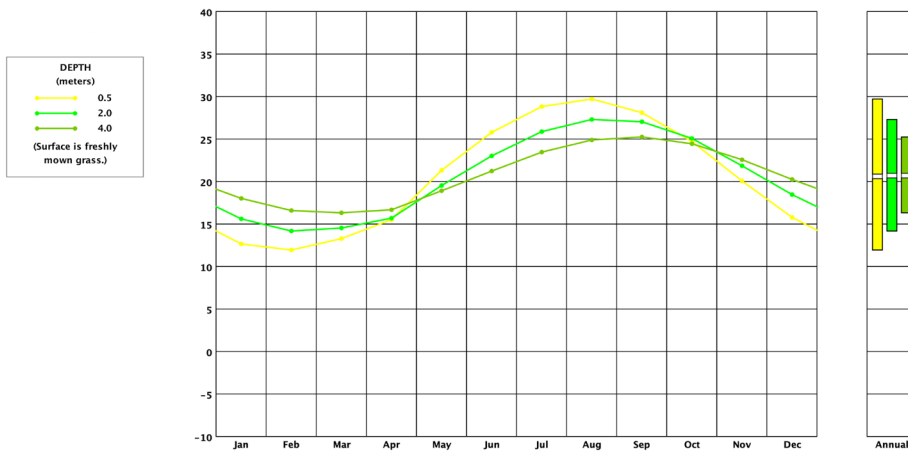
Los principales factores climáticos que he querido analizar en ambos casos son los que afectan directamente al confort humano, estos son: temperatura del aire, radiación solar, movimiento del aire y humedad.

Los siguientes datos meteorológicos se han obtenido usando el programa *Climate Consultant*. Puesto que la web oficial *EnergyPlus Weather Data*⁶ no disponía de datos meteorológicos de las zonas a estudiar, se ha optado por usar los datos publicados por *Climate OnBuilding*⁷ que dispone de estadísticas climáticas más localizadas de regiones dentro de cada país actualizadas hasta el año 2023.

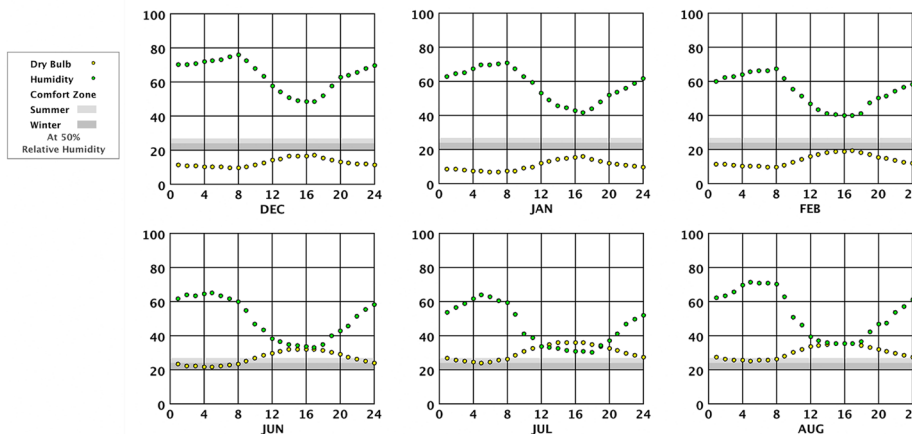
Todas las gráficas de este subcapítulo se han obtenido usando el programa *Climate Consultant*.



2.27. Gráfica de temperatura. (Matmata, Túnez)



2.28. Gráfica de temperatura del terreno. (Matmata, Túnez)



2.29. Gráficas de humedad. (Matmata, Túnez)

13. U.S. Department of Energy, “Energy Plus Weather Data”, EnergyPlus.net, accedido en marzo de 2025.

14. Linda K. Lawrie, y Drury B. Crawly, “Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)”, Climate.OneBuilding.org, 2022, accedido en marzo de 2025.

Matmata, Túnez

Datos tomados para:

Localización: Gabes-Matmata, Túnez

Latitud/Longitud: 33.733° Norte, 9.917° Este

Altitud: 112 metros

Años: 2009-2023

Tipo climático: desértico o árido cálido (BWh)

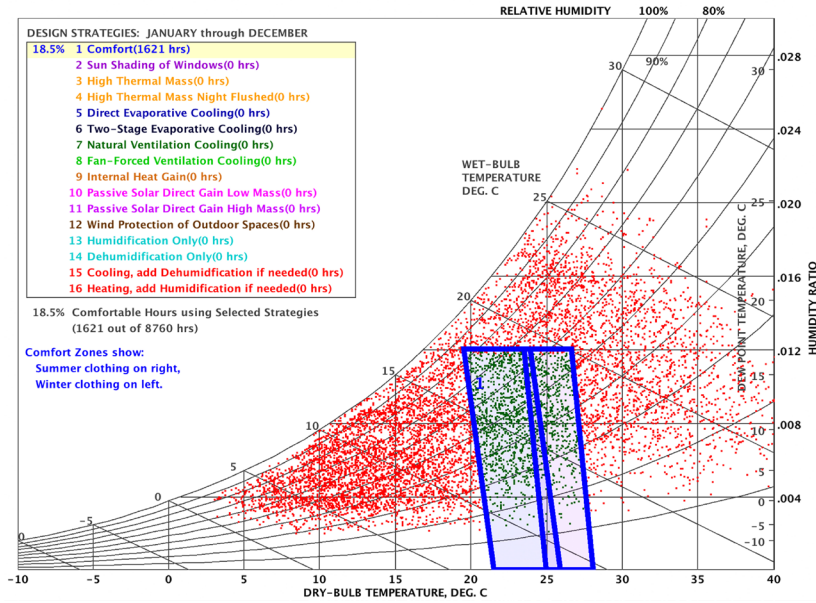
2.30. Tabla resumen de los datos obtenidos. (Matmata, Túnez) Elaboración propia.

Variable	Invierno (DEF)	Primavera (MAM)	Verano (JJA)	Otoño (SON)
Tª media del aire	10-15 °C	15 – 23 °C	26-30 °C	23-16 °C
Máx.media. (día)	16-19 °C	22 – 29 °C	33-37 °C	22-32 °C
Máx. registrada	31 °C	41 °C	> 46 °C	40 °C
Mín. media (noche)	6-9 °C	11 – 18 °C	22-25 °C	12-22 °C
Mín. registrada	4 °C	7 °C	18 °C	8 °C
Humedad relativa media	57-63 %	55-60 %	45-52 %	52-61 %
Viento medio	4-5 m s ⁻¹	4-5 m s ⁻¹	5-6 m s ⁻¹	4-5 m s ⁻¹
Dirección dominante	O-SO (240°)	E-SE (70-100°)	E-SE (80-90°)	O-SO (250-230°)
Radiación global media diaria	3,3-4,2 kWh m ⁻²	5,5-6,7 kWh m ⁻²	7,3-7,8 kWh m ⁻²	4,5-5,8 kWh m ⁻²
Tª del suelo a 4 m	18 °C	19 °C	26-27 °C	21 °C
Tª estable del terreno	21 °C	21 °C	21 °C	21 °C

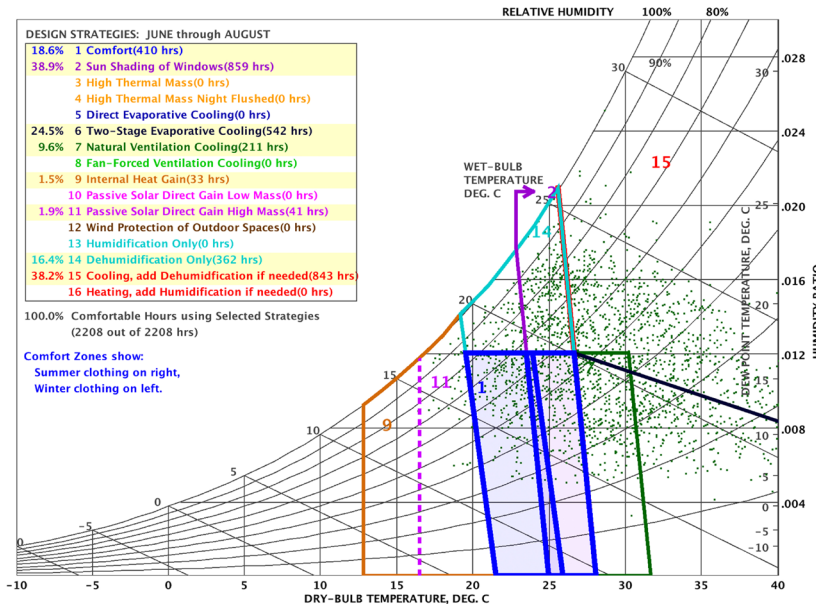
Situada a 33 °44' N y apenas 112 m sobre el nivel del mar, la zona de Matmata presenta el clima típico del desierto cálido costero del Norte de África. El termómetro oscila con amplitudes acusadas no sólo entre estaciones (de medias invernales próximas a 12°C a veranos que superan de forma rutinaria los 30°C), sino también con saltos diarios que rondan los 15°C. El intervalo más exigente aparece entre mayo y septiembre: las máximas registradas superan los 46°C y la temperatura apenas baja de 20°C al anochecer, lo que define una ola de calor prolongada.

La sequedad se acentúa a lo largo del día. La humedad relativa, aunque al amanecer ronda el 60%, desciende a un 25-35% al mediodía, favoreciendo una atmósfera muy transparente: la radiación global diaria supera los 7 kWh m⁻² en pleno verano y el acumulado anual ronda los 2 300 kWh m⁻². Ese cielo limpio también explica la gran amplitud térmica nocturna. Los vientos mantienen una velocidad media de 4-5 m s⁻¹, con un régimen bimodal (brisas del suroeste en invierno y de levante en verano) ideal para ventilar de manera cruzada las viviendas excavadas tradicionales.

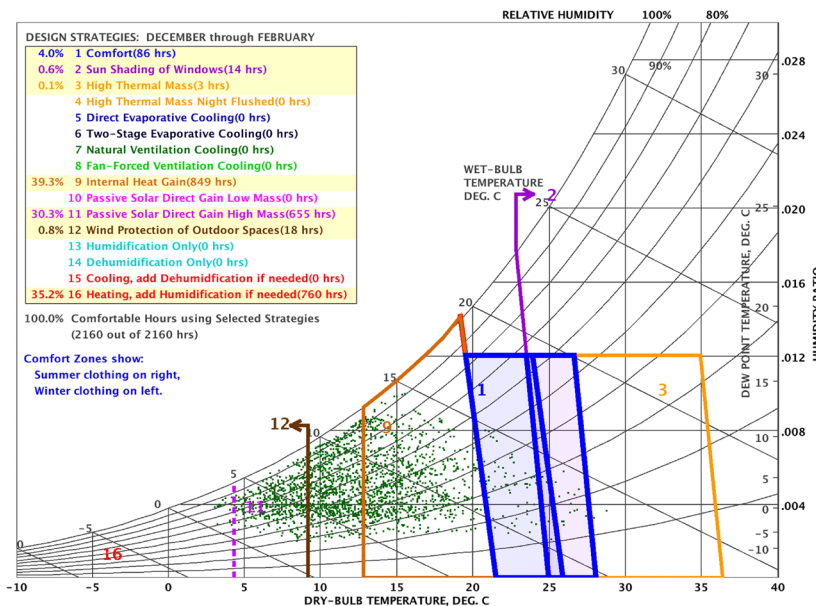
Bajo la superficie, el terreno actúa como amortiguador: a 4 m de profundidad la temperatura se mantiene estable, entre 18°C en enero y 27°C en agosto; y a partir de los 5-6 m de profundidad el terreno adquiere una temperatura estable que no varía a lo largo del año, y que coincide con la temperatura media anual, 21°C en el caso de Matmata un dato útil para sistemas de intercambio geotérmico de baja entalpía.



2.31. Diagrama higratérmico de todo el año. (Matmata, Túnez)



2.32. Diagrama higratérmico de verano con estrategias de diseño. (Matmata, Túnez)



2.33. Diagrama higratérmico de invierno con estrategias de diseño. (Matmata, Túnez)

Si observamos el diagrama psicrométrico anual, podemos ver que, a lo largo del año, si no se contase con ningún sistema de mitigación en el interior de los edificios, tan solo contaríamos con un 19% de momentos de confort a lo largo del año. Para mejorar esto, el programa nos propone una serie de soluciones. Sin embargo, parece más oportuno hacer este análisis de manera separada para verano e invierno.

Durante los meses de verano (junio, julio y agosto), el programa propone una serie de estrategias que podríamos agrupar en cuatro grupos principales: los que promueven un sombreado efectivo; y la ventilación natural; los que se han usado tradicionalmente para el tipo de clima; y los que tienen relación con los materiales y envolvente utilizados. Dentro de las cuales se proponen estrategias más específicas. A continuación, presento un listado traducido e interpretado de las estrategias propuestas que considero relevantes para el estudio del caso, dejando de lado las herramientas activas y elementos como los cerramientos de vidrio, que son inexistentes en estos casos de arquitectura vernácula, los números entre paréntesis representan las estrategias del programa a las que hacen referencia.

Protección solar:

- Uso de voladizos o toldos móviles diseñados para esta latitud.
- Zonas externas sombreadas.
- Uso de plantas y vegetación que proporcionan sombra y enfrían el aire.

Ventilación natural:

- Ventilación natural adecuada con ventanas bien sombreadas y orientadas al viento dominante. Con disposición cruzada para facilitar la ventilación cruzada.
- Porches y patios interiores con protección para promover el flujo de aire de manera pasiva (tiro térmico).

Diseño pasivo tradicional:

- Uso de masa térmica con aperturas pequeñas y ventilación nocturna.
- Patios internos bien sombreados con fuentes para enfriar el aire (enfriamiento evaporativo) y generan microclimas protegidos.
- Planta alargada y estrecha para maximizar ventilación cruzada.

Materiales y envolvente:

- Materiales de colores claros y cubiertas planas.
- Barreras radiantes para reducir ganancia de calor por el techo.

Para el invierno (diciembre, enero y febrero), las estrategias propuestas se podrían agrupar en la captación y aprovechamiento solar pasivo; el uso de aislamiento térmico y una envolvente eficiente; y el diseño pasivo tradicional.

Captación y aprovechamiento solar:

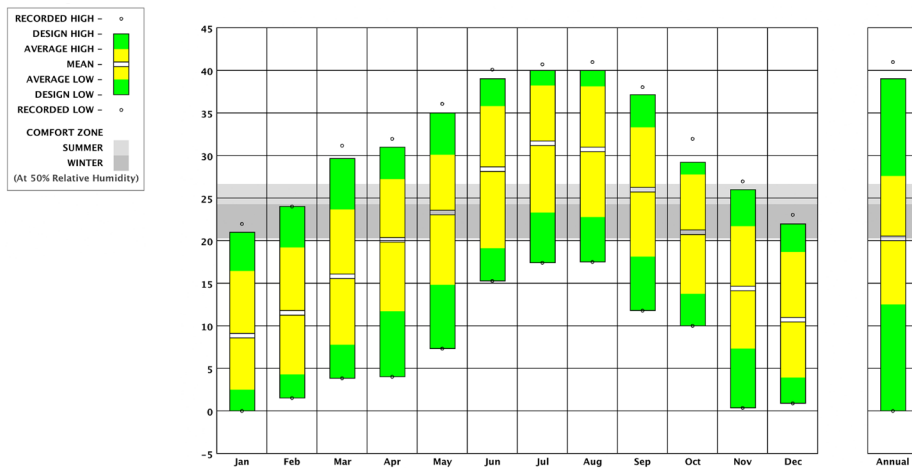
- Los huecos pueden estar sin sombrear. Evitar plantar árboles que puedan bloquear el sol.
- Espacios exteriores soleados y protegidos del viento que se puedan usar durante el invierno.

Diseño pasivo tradicional:

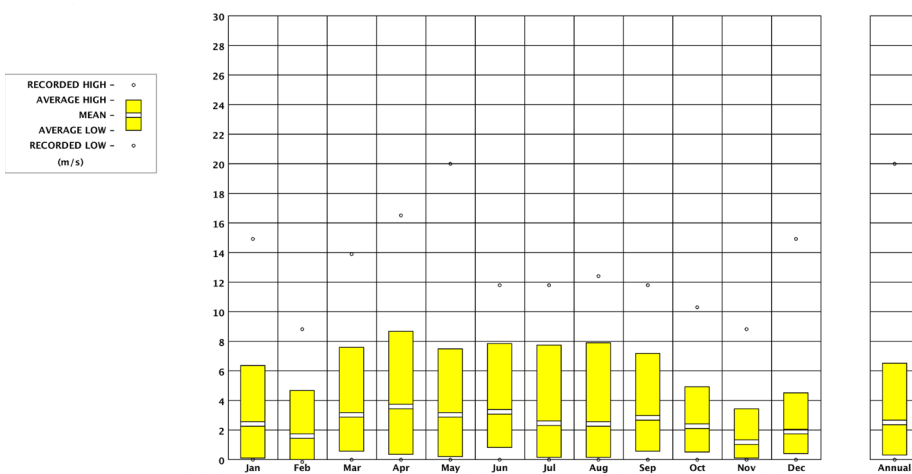
- Organizar el plano del edificio para que el sol penetre en los espacios de uso diurno.
- Aprovechamiento de la construcción con alta masa térmica para que el edificio se caliente rápido por la mañana.
- Plantas compactas con protección del viento.
- Ubicar zonas de almacenamiento en el lado más frío para que sirva de amortiguador térmico.

Aislamiento térmico y envolvente eficiente:

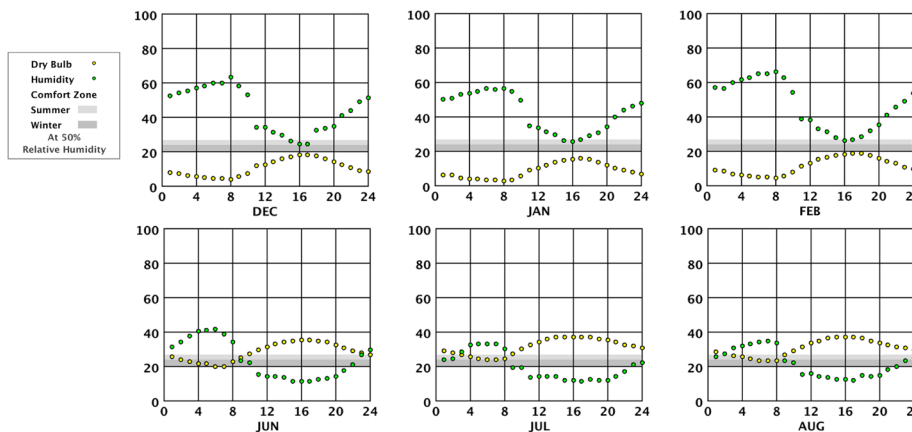
- Mantener el edificio hermético y añadir aislamiento, así como contraventanas, para mantener el calor generado en el interior.



2.34. Gráfica de temperatura. (Ourzazate, Marruecos)



2.35. Gráfica de viento. (Ourzazate, Marruecos)



2.36. Gráficas de humedad. (Ourzazate, Marruecos)

Ourzazate, Marruecos

Datos tomados para:

Localización: Ourzazate, Marruecos

Latitud/Longitud: 30.939° Norte, 6.909° Oeste

Altitud: 1153 metros

Años: 2009-2023

Tipo climático: desértico o árido cálido (BWh)

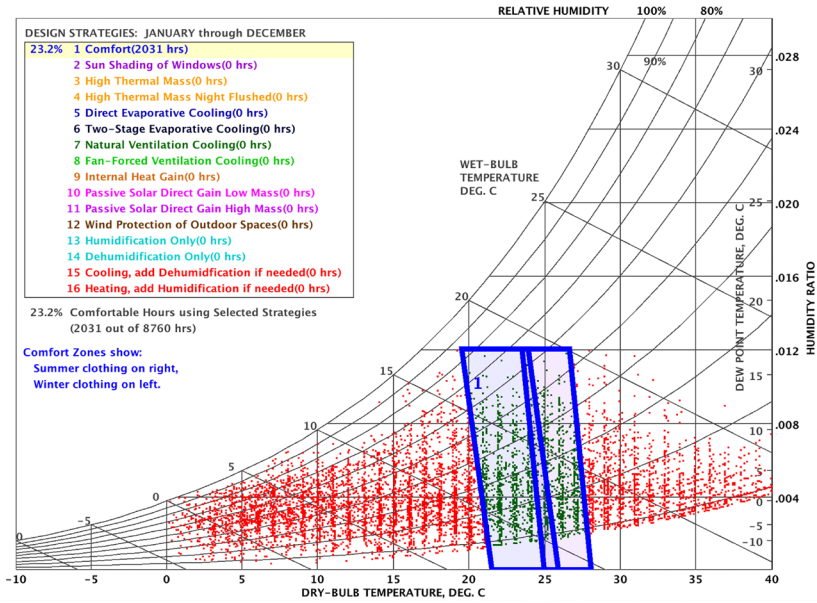
2.37. Tabla resumen de los datos obtenidos. (Ourzazate, Marruecos) Elaboración propia.

Variable	Invierno (DEF)	Primavera (MAM)	Verano (JJA)	Otoño (SON)
Tª media del aire	8-12 °C	15-23 °C	28-31 °C	25-14 °C
Máx. media. (día)	16-19 °C	24-30 °C	36-38 °C	22-33 °C
Máx. registrada	27-32 °C	37-41 °C	≥ 45 °C	38 °C
Mín. media (noche)	3-4 °C	8-15 °C	19-24 °C	8-18 °C
Mín. registrada	-3-0 °C	2-4 °C	12-16 °C	5 °C
Humedad relativa media	42-46 %	35-27 %	20-23 %	25-36 %
Viento medio	2 m s ⁻¹	3 m s ⁻¹	3 m s ⁻¹	2 m s ⁻¹
Dirección dominante	O-NO (280-310 °)	NO-N (290-330 °)	S-O-NO (190-320 °)	NO y N
Radiación global media diaria	3,9-4,9 kWh m ⁻²	6,1-7,5 kWh m ⁻²	7,5-7,9 kWh m ⁻²	6,1-5,2 kWh m ⁻²
Tª del suelo a 4 m	18 °C	20 °C	27 °C	22 °C
Tª estable del terreno	20 °C	20 °C	20 °C	20 °C

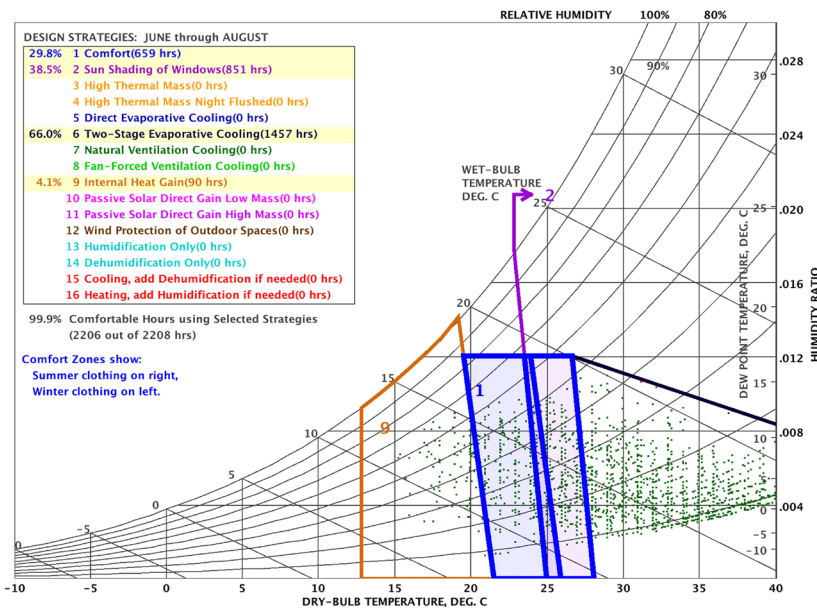
Enclavada en la meseta pre-atlásica (30 °56' N, 1 153 sobre el nivel del mar) Ouarzazate cuenta con un clima que mezcla la aridez sahariana con la altitud del Atlas. El resultado es un clima desértico de interior con saltos térmicos aún más acusados que los de Matmata. Las medias invernales bajan a 8 °C y con alguna helada ligera en enero o febrero; sin embargo, durante el día el sol eleva la temperatura hasta los 18–20 °C. En verano la situación se invierte: durante el día las máximas pueden llegar a los 45 °C en episodios extremos, pero la atmósfera seca permite que el termómetro caiga por debajo de 20 °C antes del amanecer, ofreciendo un respiro que no existe en ambientes más húmedos.

La humedad relativa se sitúa gran parte del año por debajo del 30 %; en agosto llega a registrar mínimos del 10 %, bastante más seco que Matmata. Ese aire limpiísimo se traduce en una radiación mayor, entre 7,5 y 7,9 kWh m⁻² en verano y una acumulación anual que supera los 2 650 kWh m⁻². El viento rara vez pasa de los 3 m s⁻¹ de media, aunque en primavera pueden producirse ráfagas de 15–20 m s⁻¹. Predominan las direcciones del oeste y noroeste, lo que facilita la purga nocturna de calor acumulado en los edificios.

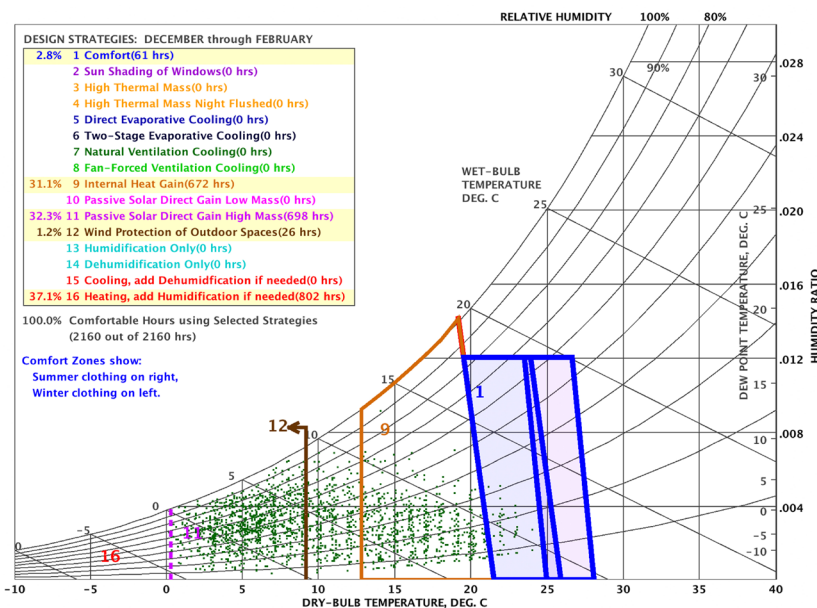
En lo que respecta al confort en este caso, en el diagrama psicrométrico podemos observar un 23% de confort anual en el interior de los edificios, si no se contase con sistemas termodinámicos.



2.38. Diagrama higrotérmico de todo el año. (Ourzazate, Marruecos)



2.39. Diagrama higrotérmico de verano con estrategias de diseño. (Ourzazate, Marruecos)



2.40. Diagrama higrotérmico de invierno con estrategias de diseño. (Ourzazate, Marruecos)

Para combatir el clima en los meses de verano (junio, julio y agosto), el programa propone diversas soluciones que podemos agrupar en: las que buscan protección y control solar directo; las que promueven una ventilación cruzada con estrategias de enfriamiento; y las estrategias pasivas tradicionales. Muchas de las herramientas propuestas son similares a las vistas previamente en Matmata.

Sombreamiento y control solar directo:

- Uso de voladizos y toldos para proteger el interior de la radiación solar directa.
- Materiales claros y cubiertas reflectantes que reduzcan el calentamiento por conducción.
- Porches o patios sombreados.

Ventilación cruzada y estrategias de enfriamiento

- Ventilación cruzada pasiva colocando ventanas opuestas y bien orientadas en función de los vientos dominantes y el uso.
- Espacios abiertos interiores que sirvan de ventilación vertical y chimenea o tiro térmico.
- Enfriamiento evaporativo y humidificación del aire seco, por medio de elementos de agua y pavimentos húmedos.

Estrategias pasivas tradicionales:

- Alta masa térmica con ventilación por la noche para que se enfríe por la noche (inercia térmica).
- Espacios enterrados y semi-enterrados que mantengan una temperatura constante.

Durante el invierno (diciembre, enero y febrero), las estrategias se pueden agrupar, al igual que en Matmata, en: la captación y aprovechamiento solar pasivo; el uso de aislamiento térmico y una envolvente eficiente; y el diseño pasivo tradicional.

Captación y aprovechamiento solar:

- No sombrear las ventanas durante el día.
- Usar masa térmica (muros gruesos y forjados), para almacenar calor solar por radiación y conducción y liberarlo por la noche.

Aislamiento térmico y envolvente eficiente:

- Envolvente bien sellada y aislada para reducir la demanda de energía.
- Uso de cortina, persianas o contraventanas operables para evitar pérdidas por la noche.
- Formas compactas, con plantas cuadradas o con baja relación superficie/volumen para evitar pérdidas.

Diseño pasivo tradicional:

- Organización de espacios interiores en función de la orientación solar y el uso para maximizar la iluminación y el calor natural.
- Espacios exteriores soleados, pero protegidos del viento.

Síntesis

Matmata y Ouarzazate comparten un trasfondo árido y muy soleado, aunque la primera debido a su proximidad al mar tiene un ambiente ligeramente más húmedo y con cierta estabilidad térmica día-noche, mientras la segunda se beneficia de noches más frescas por su mayor altitud, con cambios más bruscos del día a la noche. Ambos entornos exigen estrategias pasivas de sombreado, masa térmica y ventilación, reforzadas selectivamente con enfriamiento evaporativo

3 Análisis y representación gráfica

Para elaborar modelos gráficos representativos de ambos casos, además del análisis del sistema constructivo, se han tomado como referencia plantas y secciones extraídas de diversas publicaciones.

En el caso de las viviendas excavadas de Matmata, la información disponible se limita a planos y secciones de carácter esquemático. Por ello, he desarrollado un modelo interpretativo, en el que he reunido aquellas características que consideraba más relevantes para llevar a cabo un análisis bioclimático completo, respetando siempre las proporciones y descripciones obtenidas a partir de libros y esquemas consultados.

Por otro lado, en el caso de las kasbahs del sur de Marruecos, tras realizar varios dibujos basados en diferentes secciones, opté por centrarme en un ejemplo concreto: la kasbah de Amridil, situada en el oasis de Skoura (en la misma provincia que Ouarzazate). Esta elección se debe a que presenta una planta y una sección especialmente representativas de este tipo de construcciones, y además cuenta con mayor documentación que otras kasbahs estudiadas.

3.1. Modelo de condiciones higrotérmica verano/invierno

Con el objetivo de obtener un modelo térmico con el que realizar una comparativa del comportamiento termodinámico de los casos en verano e invierno (día y noche), en base a los datos obtenidos del análisis climático previo, se han establecido los siguientes valores de temperatura y humedad relativa del ambiente exterior en cada caso:

3.1. Tabla de ambientes exteriores (Elaboración propia)

Ambiente exterior	Matmata (TUN)		Ouarzazate (MAR)	
	T (°C)	H.R. (%)	T (°C)	H.R. (%)
Verano – día	35-38	25-35	38-41	10-15
Verano – noche	20-23	60-65	19-22	30-40
Invierno – día	16-19	50-55	16-19	30-40
Invierno – noche	5-8	65-75	2-5	60-70

Para establecer los valores de las condiciones ambientales en el interior de cada caso de estudio, se ha hecho una estimación a partir de datos obtenidos de otros estudios.

En Matmata, gracias al gradiente térmico y a la temperatura estable del terreno, la temperatura de las habitaciones excavadas se mantiene durante todo el año en torno a la temperatura del terreno que las rodean. El aire de renovación, aunque ligeramente refrigerado o calentado por el conducto excavado, varía ligeramente la temperatura del aire, que dependerá entre

otras cosas de la profundidad a la que se encuentre la habitación. Si esta se encuentra a más de 6 metros, el terreno tendrá la temperatura media anual. Aparte podemos suponer que el terreno y la falta de luz natural elevarán la humedad relativa. El estudio en el que me baso establece una temperatura interior de 25°C y una humedad relativa del 40% ¹, sin embargo, no especifica la altura a la que mide estos valores, por lo que yo he estimado una temperatura interior de 23-25°C y una humedad relativa del 40-50% para verano durante el día, y una temperatura interior de 15-19°C y una humedad relativa del 75% en invierno por la noche.

Por otro lado, para las kasbahs al sur de Marruecos no he encontrado estudios específicos con relación a su temperatura interior, pero sí he encontrado uno en el que analiza construcciones con sistemas constructivos parecidos de la zona, por lo que he tomado estos valores como referencia ². Durante los días de verano el ambiente interior tiene una temperatura de 27-29°C y una humedad relativa del 25-35%, y por la noche, la temperatura desciende a 23-25°C y la humedad aumenta hasta 40-50% por el aire que proviene del Atlas. Y en invierno, durante el día la temperatura interior es de 17-20°C y la humedad relativa del 45-55%, y de 13-16°C con una humedad del 55-65% por la noche.

Ambiente interior	Matmata (TUN)		Ouarzazate (MAR)	
	T (°C)	H.R. (%)	T (°C)	H.R. (%)
Verano - día	23-25	40-50	27-29	25-35
Verano - noche	21-23	65-75	23-25	40-50
Invierno - día	19-21	50	17-20	45-55
Invierno - noche	15-19	75	13-16	55-65

3.2. Tabla de ambientes interiores (Elaboración propia)

Teniendo en cuenta que la temperatura de confort térmico es de entre 21 y 28°C, y la humedad relativa del aire de entre 30 y 70%, podemos observar que, durante el verano, tanto en las viviendas excavadas como en las kasbahs se consigue alcanzar niveles dentro de los rangos de confort térmico para los ambientes interiores, con algunos valores en el límite, como la temperatura y humedad relativa durante los días de verano en las kasbahs y la humedad relativa por las noches en Matmata.

Por otro lado, durante el invierno, los valores se quedan a medio camino de llegar al confort térmico. Esto es comprensible, ya que estos edificios están pensados para afrontar principalmente las condiciones extremas que sufren en verano. Sin embargo, estos valores de invierno no dejan de ser relativamente aceptables, especialmente durante el día.

15. Karima El Azhary, Mohamed Oukarrouch, Lagma Laaroussi, Mohammed Garoum, y Majid Mansour. "Impact of Traditional Architecture on the Thermal Performance of Building in South Morocco", en *Green Building and Renewable Energy*, ed. por Ali Sayigh. (Researchgate, 2020), 345.

16. Hala Mohamed Raslan, y Dalia Shebl Saeed. "Re-evaluating the Health Performance of Historical Buildings Using WELLV1 Rating System". *Computational Urban Science* 3, artículo 27. (Springer, 2023), 12

3.2. Análisis y representación gráfica de las estrategias bioclimáticas

Si bien ambos ejemplos presentan algunas características distintas respecto a las condiciones climáticas a las que se exponen debido a la diferencia de altitud, tienen necesidades muy parecidas.

Durante el verano, las necesidades son las siguientes: protección solar para evitar ganancias de calor innecesarias; la ventilación adecuada de patios y espacios interiores para renovar el aire constantemente y eliminar el calor generado (por las personas y las actividades que realizan), así como el exceso de humedad en el interior (en las viviendas excavadas), y aumentarla en las kasbahs (ambiente más seco) ; el enfriamiento del aire (enfriamiento evaporativo); reducir el calor absorbido por radiación solar por medio de una envolvente adecuada y, disipar el calor absorbido con materiales de gran inercia térmica (esta última es de las más importantes).

Durante el invierno, por otro lado, las necesidades son algo distintas: aprovechar la radiación solar directa; almacenar el calor absorbido durante el día para liberarlo por la noche (inercia térmica); protección del viento frío; aislamiento térmico para mantener el calor generado en el interior.

Para lograr cumplir con todas estas necesidades, los casos estudiados combinan el uso de técnicas constructivas y de diseño arquitectónico adecuados, con el uso de dispositivos termodinámicos.

Viviendas excavadas en Matmata

En Matmata la decisión arquitectónica (y defensiva) de excavar en el terreno hace la mayor parte del trabajo, el gradiente térmico del terreno y la temperatura estable que adquiere, a la profundidad a la que se encuentran las habitaciones, frescor durante el verano, y calor durante el invierno, además de que su gran inercia se encarga de absorber y disipar todo el calor absorbido por radiación. El pozo central, dada su profundidad queda parcialmente sombreado, funciona como tiro térmico que succiona el aire caliente hacia arriba y protege del viento caliente en verano y del frío en invierno.

Entre los dispositivos termodinámicos que utilizan encontramos el árbol, que aporta sombreado y, junto con el pozo aportan humedad y refrescan el ambiente generando un microclima (enfriamiento evaporativo); chimeneas térmicas que facilitan una ventilación cruzada y enfrían o calientan el aire ligeramente por convección; paredes encaladas que reflejan la onda de radiación solar (reflexión parcial); huecos profundos que sirven como protección solar; huecos pequeños y escasos que reducen la pérdida de calor las noches de invierno (aislamiento térmico); alfombras y tapices (aislamiento térmico).

Verano día:

Durante los días de verano el pozo sirve como protección contra el viento que viene del desierto (caliente y seco), aunque parcialmente sombreado por la pared norte y el árbol, las paredes y el fondo del patio se calientan durante el día, lo que provoca que el aire ascienda, generando cambio de presión que succiona el aire de las habitaciones que se renuevan por las chimeneas de ventilación. El calor del aire que entra por las chimeneas se disipa ligeramente por convección con las paredes del conducto gracias al gradiente térmico del terreno. Las constantes renovaciones de aire reducen la humedad acumulada en las habitaciones, que gracias a la temperatura estable del terreno (21°C), mantienen una temperatura interior constante de entre 23 y 25°C y una humedad relativa entre el 40% y el 50%. El pozo evapora agua, y junto con la humedad del árbol, se genera un pequeño microclima al fondo del patio. La pared encalada, generalmente blanca, refleja la onda térmica de la radiación solar, reduciendo el calor absorbido por la pared vertical del terreno, especialmente en torno a las habitaciones.

Verano noche:

Durante la noche la temperatura desciende y el viento proviene del mar, una brisa marina más refrescante y húmeda, la ventilación cruzada entre las chimeneas y el patio, junto con el enfriamiento evaporativo del patio hacen que la temperatura dentro de las habitaciones descienda ligeramente hasta casi la temperatura estable del terreno con 21-23°C y una humedad relativa mayor por la humedad del aire marino, de entre 65% y 75%.

Invierno día:

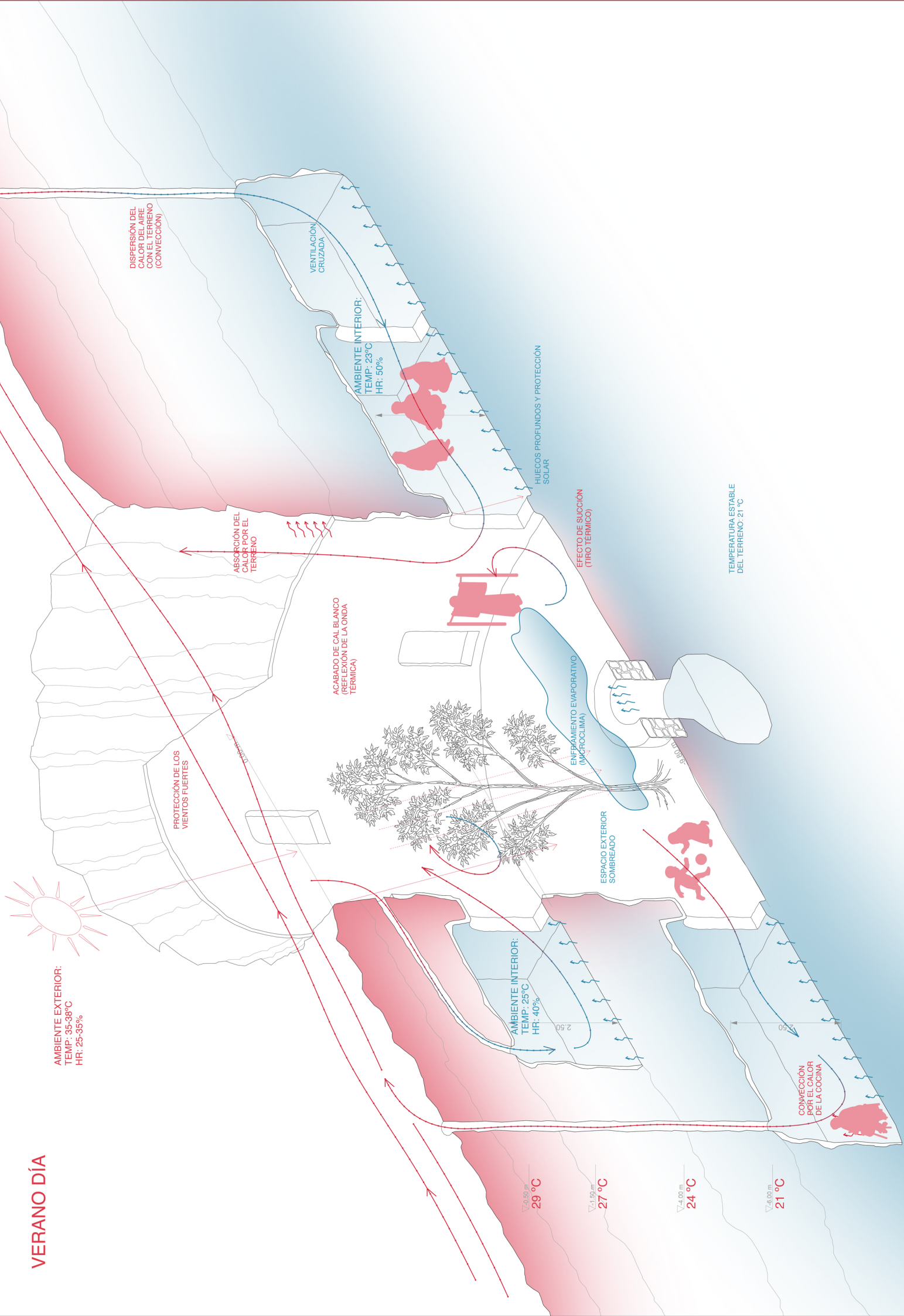
En invierno durante el día, aunque en la superficie el terreno tiene una temperatura de 12°C, la temperatura a la altura de las habitaciones sigue siendo de 21°C, por lo que las habitaciones se mantienen a una temperatura similar, ligeramente reducida por los mismos flujos de renovación de aire que veíamos durante el verano, lo que deja una temperatura interior de 19-21°C y una humedad relativa del 50%. Además, dado que la temperatura exterior no es tan extrema, esto permite y promueve un uso más activo del patio durante el día.

Invierno noche:

Por la noche la temperatura exterior desciende deliberadamente hasta los 5-8°C, por lo que se busca mantener el calor generado en el interior de las habitaciones cerrando las puertas para cortar la ventilación cruzada, y con alfombras y tapices que reducen las pérdidas por conducción con los cerramientos. Aparte, las habitaciones a los laterales y encima, funcionan como colchón térmico. Con una temperatura interior de 15-19°C y una humedad relativa del 75%.

VERANO DÍA

AMBIENTE EXTERIOR:
TEMP: 35-38°C
HR: 25-35%

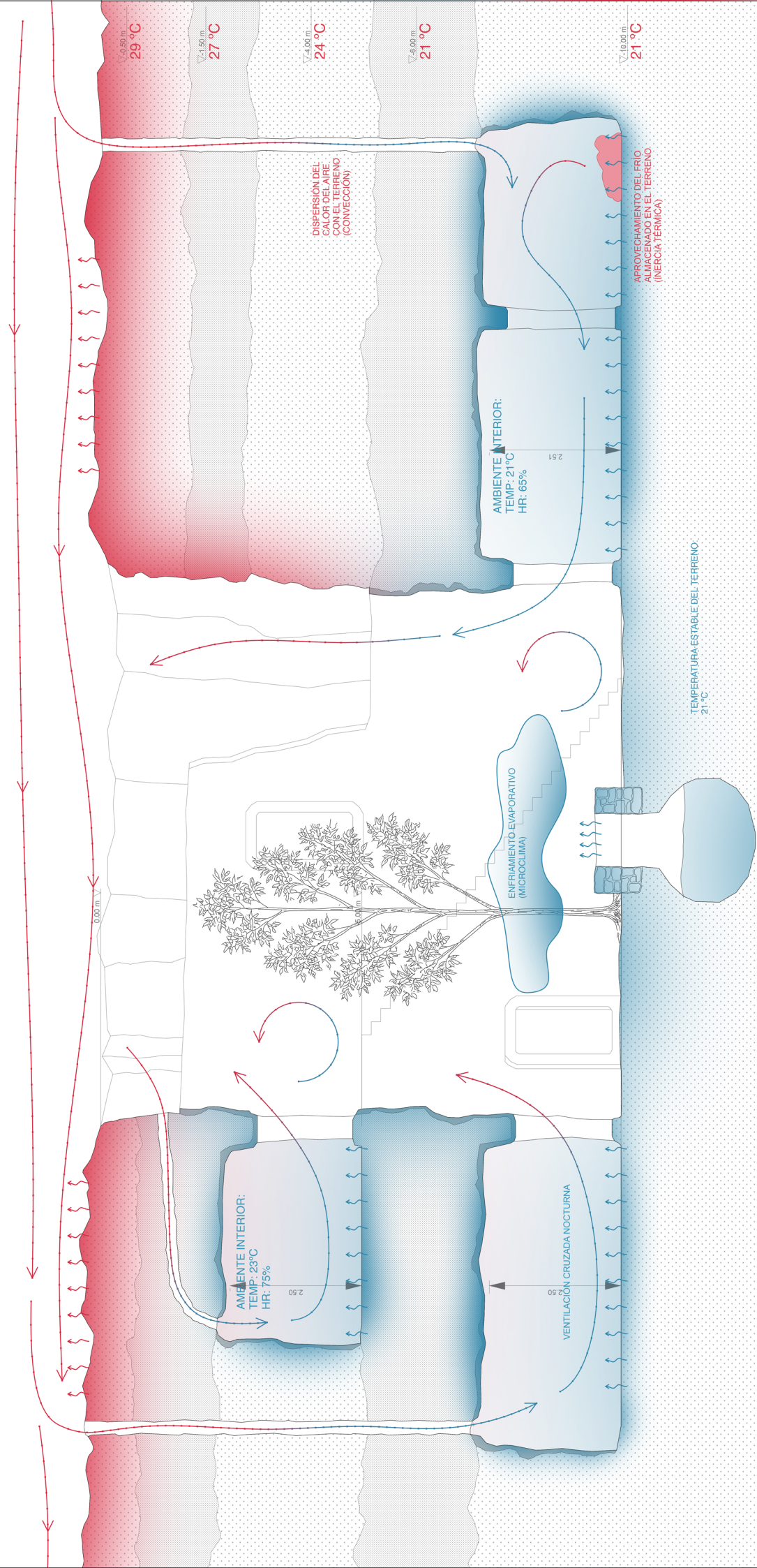


VERANO NOCHE



AMBIENTE EXTERIOR:
TEMP: 20-23°C
HR: 60-65%

BRISA MARINA



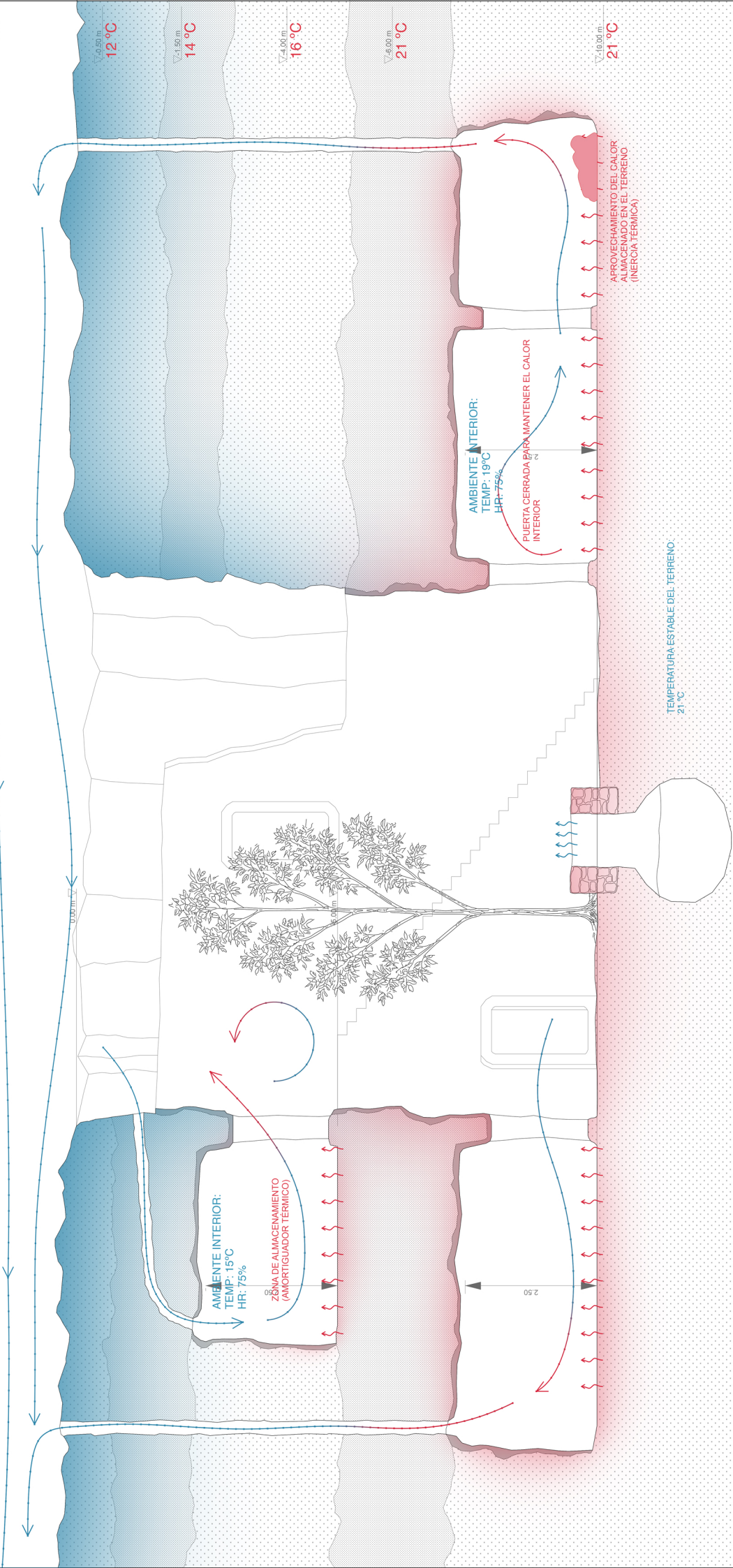
INVIERNO NOCHE



AMBIENTE EXTERIOR:
TEMP: 5-8°C
HR: 65-75%

PROTECCIÓN DE LOS VIENTOS FUERTES

EFFECTO DE SUCCIÓN
(TIRO TÉRMICO)



Kasbahs al sur de Marruecos

En las fortalezas de barro la arquitectura defensiva, así como la técnica constructiva y los materiales disponibles vuelven a ser uno de los principales sistemas de mitigación climática, los muros de tapial de 60-80 cm de espesor tienen una gran inercia térmica que absorbe el calor y lo disipa a lo largo del día, además de una gran capacidad higroscópica que regula la humedad del aire (regulación higrótérmica). Su forma compacta le ayuda a disminuir la pérdida de frío o calor por la envolvente (aislamiento térmico). Además, las kasbahs se suelen ubicar en calles y tejidos compactos reducen la temperatura radiante (sombreamiento).

Entre sus dispositivos termodinámicos podemos encontrar: el pozo de luz que sirve como una chimenea con tiro térmico; el patio cubierto entorno al pozo que embolsa el aire fresco; las ventanas que son profundas (protección solar) y pequeñas (aislamiento térmico); la técnica tradicional de humedecer el pavimento que provoca un enfriamiento evaporativo; patio soleado en cubierta protegido del viento; galerías cubiertas en torno a ese patio; contraventanas, alfombras y tapices para reducir las pérdidas de calor interior en invierno (aislamiento térmico).

A todo esto, se le puede sumar el carácter migratorio de estos edificios a lo largo del año, el cual se podría considerar un mecanismo "cultural". Durante el verano se usa el interior (sobre todo las plantas bajas) durante el día y la cubierta por la noche, mientras que en invierno sucede a la inversa.

Verano día:

Durante el día, al igual que en Matmata, el aire que proviene del desierto del Sahara eleva mucho la temperatura exterior, por lo que, se usan principalmente los espacios interiores. Los muros de tapial y adobe absorben la mayoría de la temperatura radiante del sol y el pozo de luz funciona como tiro térmico que saca el aire caliente del interior, dejan una bolsa de aire fresco en los patios que lo rodean. Para generar un ambiente aún más fresco en el interior, se mojan los suelos, reduciendo la temperatura del ambiente interior hasta los 27-29°C y aumenta la humedad relativa hasta 25-35%.

Verano noche:

Al caer la noche, el aire desciende desde el Atlas, por lo que se promueve la ventilación cruzada abriendo incluso la puerta de la calle para renovar el aire del interior. El calor absorbido por la estructura de tierra comienza a irradiar al interior conforme el muro exterior se enfría, esto sumado al aire ambiente refrescante del exterior hacen de la cubierta el mejor lugar para dormir, directamente a la intemperie, o en las galerías cubiertas que rodean al patio de la cubierta, que están mejor ventiladas.

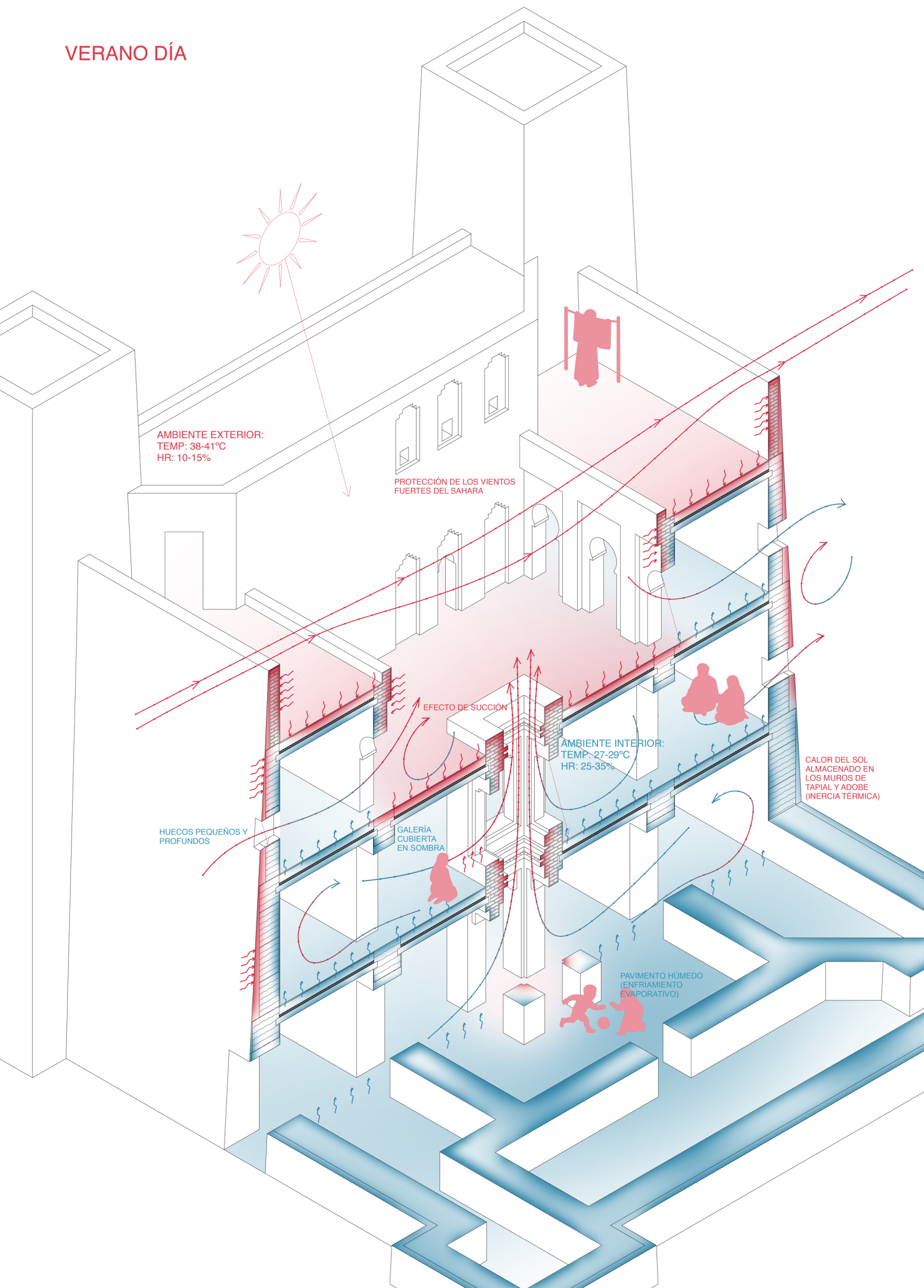
Invierno día:

Durante los días de invierno, y con el descenso de las temperaturas, incluida la del interior (2°C por debajo de la exterior), el uso de la vivienda migra hacia la cubierta soleada y las galerías cubiertas adyacentes. Los muros de tapial almacenan el calor obtenido de la radiación solar, se busca el soleamiento de los espacios cubiertos teniendo en cuenta el ángulo de incidencia solar.

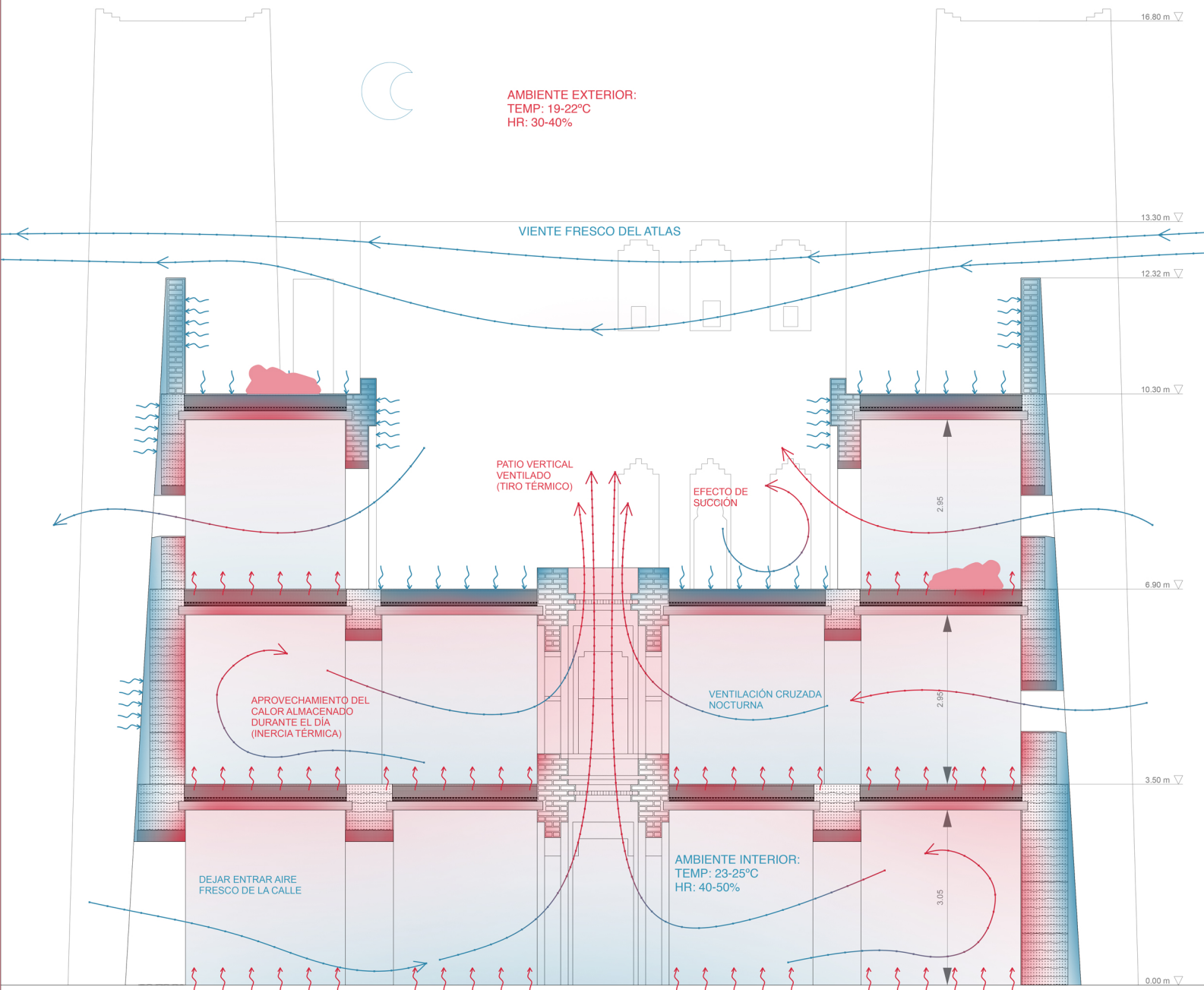
Invierno noche:

Por la noche la temperatura exterior desciende rápidamente hasta 2-5°C, el calor almacenado en la estructura se libera lentamente hacia el interior, lo que hacen de este el mejor sitio para dormir. Para evitar la pérdida de calor se cierran las puertas y contraventanas, y se usan alfombras y tapices. También se guarda a los animales en la planta baja, lo cual genera un pequeño colchón térmico.

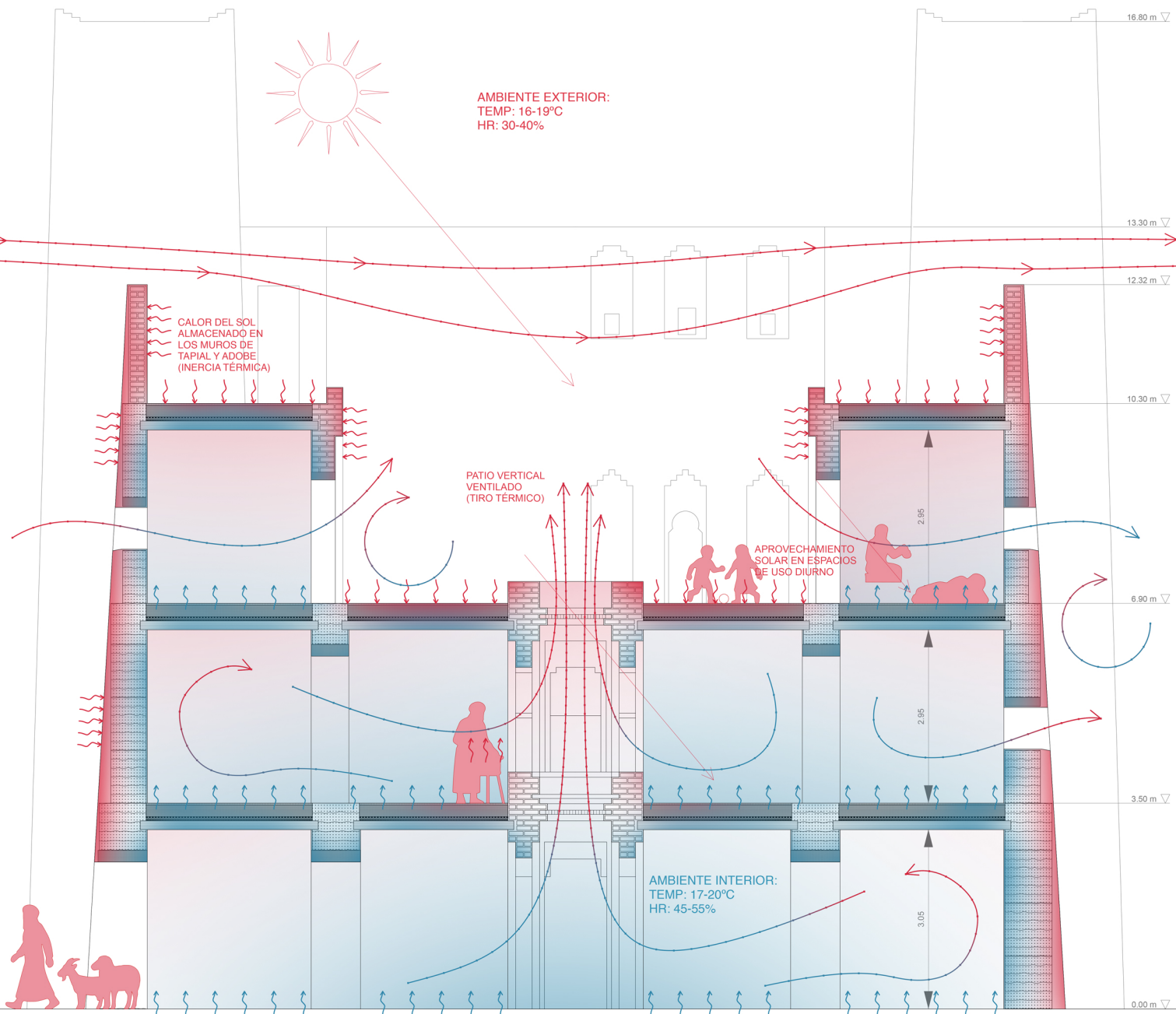
VERANO DÍA



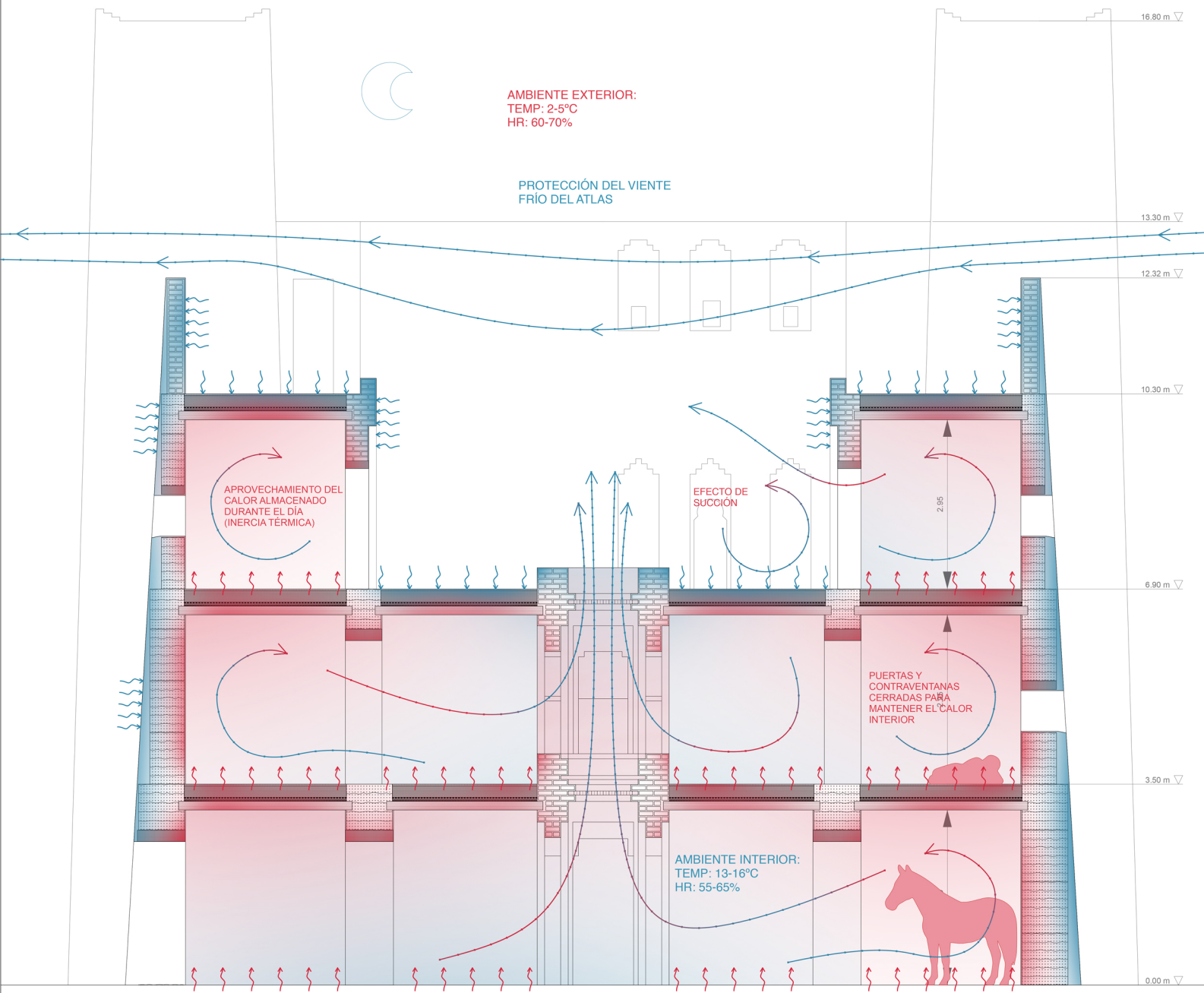
VERANO NOCHE



INVIERNO DÍA



INVIERNO NOCHE



3.3. Comparación de eficiencia bioclimática entre los casos

Si bien los dos casos estudiados consiguen enfrentarse al reto que suponen las altas temperaturas los días de verano en los climas áridos con éxito, las viviendas excavadas de Matmata logran tener una temperatura del ambiente interior más confortable y estable a lo largo de todo el año. Sin embargo, varios factores para tener en cuenta.

Empezando por las condiciones ambientales, Matmata en comparación con Ourzazate tiene una temperatura más estable gracias a su proximidad al mar, mientras que Ourzazate sufre grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche originados por su proximidad con la cordillera del Atlas, lo cual, mientras que en verano es una ventaja, en invierno es lo contrario.

Además, las viviendas excavadas de Matmata, aprovechan la estabilidad térmica del terreno a costa de tener una gran desventaja arquitectónica, ya que sacrifican la luz natural en el interior de las habitaciones. Cosa que, en las fortalezas de barro de Marruecos solucionan hábilmente con el pozo de luz y los huecos en fachada.

Por lo que podemos determinar que, aunque enterrarse en el terreno es una mejor solución a nivel higrotérmico, con un buen uso del edificio y con sistemas constructivos de gran inercia térmica como el tapial y el adobe, se puede conseguir un resultado parecido, y una solución arquitectónica más óptima, como hacen en las kasbahs.

4 Comparación con técnicas contemporáneas

4.1. Aplicación de estrategias bereberes en la arquitectura contemporánea

Dada su importancia y su utilidad tanto en verano como en invierno en los casos analizados, seguramente la estrategia más interesante para aplicar hoy en día es el uso de técnicas constructivas con gran masa térmica como el tapial, adobe u otros sistemas de tierra compactada. Solucionando o resolviendo los problemas de durabilidad y estabilidad estructural, así como reduciendo el coste de mano de obra y los tiempos de ejecución mediante la industrialización del sistema (garantizando una mayor calidad del producto), se consigue un método constructivo con gran inercia térmica de manera sostenible, ya que la tierra es un producto metabólico de “kilómetro cero” con gran reciclabilidad, por lo que está cobrando importancia estos últimos años.

4.1. *Ricola Kräuterzentrum,
Herzog & de Meuron*



Si bien hacer una vivienda completamente enterrada como las de Matmata parece algo excesivo hoy en día, solucionando problemas como el de la iluminación, se podrían diseñar algunos espacios o secciones de la casa enterrados, para aprovechar el gradiente térmico del terreno. Encontramos ejemplos de aplicaciones como la casa estudio de Fernando Higueras o la Villa Vals de SeARCH + CMA.



4.2. Villa Vals, SeARCH

Diseñar patios de luz como los de las kasbahs que sirva de tiro térmico y promueva la ventilación cruzada en verano, incorporando una cubierta o cerramientos correderos para cerrarlo y reducir las pérdidas de calor en invierno, generando así también efecto invernadero.



4.3. Casa-estudio de Fernando Higuera

Usar sistemas pasivos de captación de aire y chimeneas actualizados, que los primeros sirvan para introducir aire fresco, y las otras para succionar aire caliente, como por ejemplo chimeneas solares, que usan el mismo principio que el pozo o patio caliente de Matmata.

4.2. Nuevas técnicas del tapial

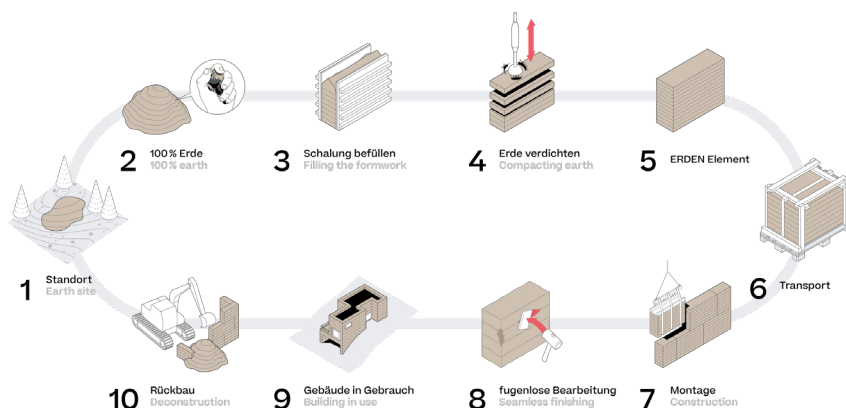
En la última década el tapial ha pasado de ser una técnica constructiva olvidada a presentarse como una solución con una baja huella de carbono, gran inercia térmica y circularidad material. Impulsado por arquitectos como Martin Rauch, Anna Heringer, Roger Boltshauser, Herzog & de Meuron y Francis Keré, entre otros, que buscan desarrollar el método haciendo frentes a las diferentes dificultades y retos que presenta.

4.2.1. Fortalezas

Como ya hemos visto anteriormente en el estudio del caso de las kasbahs al sur de Marruecos, uno de sus principales beneficios es su funcionalidad como sistema pasivo de regulación higrotérmica, su inercia térmica reduce los picos térmicos y, su capacidad higroscópica, regula la humedad relativa.

Su baja huella de carbono es otra de ellas, debido a la demanda impulsada por el marco normativo europeo para 2030. Es un material que se extrae in situ o en radios menores a 50 km, lo que reduce o anula la necesidad del transporte.

4.4. Circularidad de la tierra en la técnica del tapial



Por último, su circularidad, otro valor a favor de la sostenibilidad del sistema constructivo que, como podemos observar en el siguiente dibujo explicativo del proceso, una vez terminada la vida útil del edificio, la tierra puede volver a su lugar de origen, reforzando la idea que transmite Martin Rauch en su libro sobre construcción con tierra apisonada: *Refined earth. Construction & design with rammed earth*. En el que dice:

“Building in such a way that a house can return to “nature”, after a hundred years, without leaving any residues or contamination”, Martin Rauch.

Traducción: “Construyendo de tal forma que la casa, después de 100 años, pueda volver a la naturaleza sin dejar residuos”.¹

17. Marko Sauer y Otto Kapfinger, eds. Martin Rauch: Refined Earth. Construction and Design with Rammed Earth. 1ª ed. (Múnich: Edition DETAIL, 2015), 7

4.2.2. Retos y soluciones

Los principales retos o dificultades que presentan estos sistemas son: su durabilidad, estabilidad estructural y tiempos de ejecución.

La durabilidad, en especial por su mal comportamiento frente al agua, es uno de los principales problemas que plantea. Sin embargo, ya se están implementando soluciones constructivas para aumentar la durabilidad del sistema.

Para deshacerse del agua de lluvia que cae y resbala por la fachada, tanto Herzog & de Meuron como Roger Boltshauser en la casa Rauch, compactan una capa de cal o colocan otros elementos como bloques cerámicos cada ocho tongadas o menos que sobresale horizontalmente del plano de fachada.



4.5. Casa Rauch, por Boltshauser Architekten

También, aunque menos recomendables porque reducen la reciclabilidad de la tierra, se puede optar por usar aditivos que modifiquen la composición y comportamiento de la tierra, como hace Francis Kéré, que incorpora un 5 o 10% de cemento en los bloques de tierra comprimida (BTC) de la escuela primaria de Gando.



4.5. Escuela primaria de Gando, Francis Kéré

Además, se pueden usar otras soluciones más tradicionales, como la colocación de un zócalo pétreo o de hormigón y vuelos de cubierta (mayores incluso que los que se usan en las kasbahs) para evitar el salpiqueo y la ascensión capilar.

Los principales problemas estructurales son su mal comportamiento a tracción y contra los sismos, y su dificultad para hacer piezas de grandes luces.

Respecto a los efectos de tracción, ya se están investigando y probando sistemas de postesado con barras de acero. El edificio experimental “Torre-horno de Cham” implementa este sistema, y ha logrado construir un espacio de 9 metros de altura sin forjados intermedios ².

4.7. Torre-horno de Cham



Y en edificios donde se requieran grandes luces, se puede optar por sistemas mixtos, con sistemas autoportantes de tapial en fachada anclado a una estructura porticada de hormigón.

4.8. Ricola Kräuterzentrum,
Herzog & de Meuron



¹⁸ Boltshauser Architekten.
“Torre del horno para el Museo de la Fábrica de Ladrillos”. Archidaily,
5 de diciembre de 2021.

Por último, los tiempos de ejecución se pueden reducir mediante la industrialización del sistema. Esto, no solo contribuye a reducir los tiempos de ejecución, sino que consigue un control más minucioso de la calidad del producto, evitando fisuras por retracción que puedan afectar a su durabilidad y estabilidad estructural.

Por tanto, la industrialización y prefabricación del tapial es una de las soluciones más importantes, ya que puede contribuir a reducir en mayor o menor medida las dificultades planteadas. Todo esto, claramente sin dejar de lado la huella del transporte. En el edificio de Ricola Kräuterzentrum, por Herzog & de Meuron, se habilitó una nave cerca de la construcción para hacer los elementos prefabricados³.



4.9. Prefabricados de muro de tapial.

19. Anna Heringer, Lindsay Blair Howe y Martin Rauch. *Upscaling Earth: material, process, catalyst*. (Zúrich: gta Verlag, 2019), 61.

Conclusiones

Tras analizar los dos casos de estudio, podemos determinar que las técnicas empleadas por el pueblo bereber en este clima extremo son óptimas, ya que como hemos podido observar, en verano, que es la situación más desfavorable a la que se enfrentan, logran regular la temperatura y humedad relativas exteriores, y tener un ambiente interior aceptable en sus edificios dentro de los umbrales de confort térmico establecidos (Temp: 21-28°C y HR: 30-70%). Y en invierno, aunque se quedan a medio camino de llegar a estos, podríamos considerarlos aceptables, teniendo en cuenta que los sistemas se diseñaron para mitigar las condiciones del verano.

Mientras las viviendas excavadas consiguen una estabilidad higrotérmica anual y diaria, gracias al gradiente térmico del terreno y dada su proximidad al mar, debido a la falta de iluminación natural, las kasbahs parecen una solución más adaptable al entorno contemporáneo.

No obstante, ante la proyección de un escenario más árido en algunas zonas de España, merece la pena poner en valor las estrategias empleadas por ambas, adaptándolas a los nuevos requisitos de mercado y a nuevos entornos culturales.

Las estrategias analizadas más relevantes son el uso de materiales con gran masa térmica como la recuperación de la técnica del tapial, debido a su buen comportamiento térmico, sostenibilidad y creciente avance técnico que está teniendo esta última década. Además de aprovechar el gradiente térmico del terreno en la medida de lo posible, para espacios con poca necesidad lumínica, o con una integración arquitectónica apropiada, con lucernarios y sistemas de ventilación.

Y la implementación de patios con tiro térmico, así como chimeneas de captación de aire, combinados con elementos de agua o vegetales, que favorezcan una buena ventilación y el enfriamiento evaporativo.

La investigación se ha hecho en base a datos climáticos de 2009-2023 y tomando como referencia otros estudios similares. Sin embargo, faltan mediciones in-situ que puedan corroborar los rangos higrotérmicos estimados.

Bibliografía

LIBROS Y ARTÍCULOS:

- Brunn, Daniel. *The Cave Dwellers of Southern Tunisia: Recollections of a Sojourn with de Khalifa of Matmata*. Traducido de danés por L. A. E. B. Londres: W. Thacker & Co., 1898. Reimpresión digital, Project Gutenberg. <https://readingroo.ms/7/1/5/8/71585/71585-h/71585-h.htm>
- El Azhary, Karima, Mohamed Oukarrouch, Lagma Laaroussi, Mohammed Garoum, y Majid Mansour. "Impact of Traditional Architecture on the Thermal Performance of Building in South Morocco". En *Green Building and Renewable Energy*, editado por Ali Sayigh, Capítulo 24. Researchgate, 2020. https://www.researchgate.net/publication/337716746_Impact_of_Traditional_Architecture_on_the_Thermal_Performances_of_Building_in_South_Morocco
- Heringer, Anna, Lindsay Blair Howe y Martin Rauch. *Upscaling Earth: material, process, catalyst*. Zürich: gta Verlag, 2019.
- Loubes, J.P. *Arquitectura subterránea. Aproximación a un hábitat natural*, Colección Tecnología y Arquitectura. Barcelona: Gustavo Gili, 1985.
- Mimó, Roger. *Fortalezas de barro en el sur de Marruecos*. Madrid: Compañía Literaria, 1996.
- Moya Torres, Carlos. *Herramientas Proyectuales Bioclimáticas, tipologías Norte Africano. Las Pielas que habito. Trabajo de Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM), Universidad politécnica de Madrid, 2018.*
- Neila González, Francisco Javier. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Editorial Munilla-Lería, 2004.
- Olgay, Victor. *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- Rahm, Philippe. *Climatic Architecture*. New York: Actar Publishers, 2023.
- Rahm, Philippe. *Arquitectura inmediata*. Boletín CF+S, no 38/39 (2006): 153-156. https://ingenio.upm.es/primo-explore/fulldisplay?docid=34UPM_OJSarticl e%2F2633&context=L&vid=34UPM_VU1&lang=es_ES&search_scope=TAB1_SCOPE1&adaptor=Local%20Search%20Engine&tab=tab1&query=any,contains, philippe%20rahm%20arquitectura%20inmediata&offset=0
- Ramón, Moliner. *Ropa, sudor y arquitectura*. Madrid: Hermann Blume, 1980.
- Raslan, Hala Mohamed, y Dalia Shebl Saeed. "Re-evaluating the Health Performance of Historical Buildings Using WELLV1 Rating System". *Computational Urban Science* 3, artículo 27. Springer, 2023. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-30841-4_24
- Sauer, Marko, y Otto Kapfinger, eds. *Martin Rauch: Refined Earth. Construction and Design with Rammed Earth*. 1ª ed. Múnich: Edition DETAIL, 2015. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upmes/detail.action?docID=4332914&pq-origsite=primo>

Soriano Alfaro, Vicent. *Arquitectura de tierra en el sur de Marruecos: el oasis de Skoura*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectura, 2006.

Rudofsky, Bernard. *Architecture without architects, an introduction to nonpedigreed architecture*. New York: The Museum of Modern Art: Distributed by Doubleday, Garden City, N.Y. (1964)

RECURSOS DIGITALES:

Boltshauser Architekten. “Torre del horno para el Museo de la Fábrica de Ladrillos”. *Archdaily*, 5 de diciembre de 2021. <https://www.archdaily.cl/cl/972984/torre-del-horno-para-el-museo-de-la-fabrica-de-ladrillos-boltshauser-architekten>

Erill Soto, Berta. “España podría afrontar un clima árido para 2050, según un nuevo estudio”. *National Geographic*, 25 de septiembre de 2024. https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/espana-podria-afrontar-clima-arido-para-2050-segun-nuevo-estudio_23312#twitter

Gobierno de Navarra. *Meteorología y climatología de Navarra*, accedido en marzo de 2025, <https://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm#B>

Lawrie, Linda K., y Drury B. Crawly. “Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx)”. *Climate.OneBuilding.org*. 2022. Accedido en marzo de 2025. <https://climate.onebuilding.org/>

Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed. Madrid: RAE, 2014. <https://dle.rae.es/>

U.S. Department of Energy. “Energy Plus Weather Data”. *EnergyPlus.net*. Accedido en marzo de 2025. <https://energyplus.net/weather>

Procedencia de las ilustraciones

- 1.1. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Philippe Rahm. Climatic Architecture. (New York: Actar Publishers, 2023), página 17.
- 1.2. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Philippe Rahm. Climatic Architecture. (New York: Actar Publishers, 2023), página 17.
- 1.3. Tomado de https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3AK%C3%B6ppen-Geiger_Climate_Classification_Map.png
- 2.1. Elaboración del autor a partir de un original tomado de <https://www.oerproject.com/OER-Materials/OER-Media/HTML-Articles/Origins/Unit6/Trans-Saharan-Trade-Routes/1160L>
- 2.2. Tomado de <https://www.flickr.com/photos/congochris/2626837522/in/photostream/>
- 2.3. Tomado de <https://socks-studio.com/2023/03/26/matmata-underground-dwellings-for-an-extreme-climate/>
- 2.4. y 2.8. Tomado de Daniel Brunn. The Cave Dwellers of Southern Tunisia: Recollections of a Sojourn with de Khalifa of Matmata. Traducido de danés por L. A. E. B. Londres: W. Thacker & Co., 1898. Reimpresión digital, Project Gutenberg. <https://readingroo.ms/7/1/5/8/71585/71585-h/71585-h.htm>
- 2.5. Elaboración del autor a partir de un original tomado de J.P. Loubes. Arquitectura subterránea. Aproximación a un hábitat natural, Colección Tecnología y Arquitectura. (Barcelona: Gustavo Gili, 1985).
- 2.6. Tomado de <https://carthagemagazine.com/wp-content/uploads/2022/09/Matmata-Tunisia.jpg>
- 2.7. Elaboración del autor.
- 2.9. Tomado de <https://habitat10.epitesz.bme.hu/en/portfolio/tunisian-pit-house/>
- 2.10. Tomado de <https://www.ignant.com/2020/08/21/the-matmata-pit-dwellings-keeping-the-tunisian-indigenous-past-alive/#:~:text=%E2%80%99CA%20>
- 2.11. y 2.12. Tomado de <https://nuhadstudio.com/es/casas-trogloditas-en-el-desierto-de-sahara/>
- 2.13. Elaboración del autor (abril de 2022).
- 2.14. y 2.17. Tomado de Roger Mimó. Fortalezas de barro en el sur de Marruecos. Madrid: Compañía Literaria, 1996.
- 2.15., 2.16. y 2.19. Tomado de <https://annanoguera.com/proyecto/kasbah-ait-abou/>
- 2.18. Tomado de <https://ouarzazate.city/wp-content/uploads/2020/03/Kasbah-Amridil-1173.jpg>
- 2.20, 2.23, 2.24. Fotografías por Jorge Ruiz Nieto.

- 2.21. Fotografía de Javier Onrubia (abril de 2022).
- 2.22. Elaboración del autor (abril de 2022)
- 2.25. y 2.26. Elaboración del autor a partir de un original tomado de Carlos Moya Torres. Herramientas Proyectuales Bioclimáticas, tipologías Norte Africano. Las Pielas que habito. Trabajo de Fin de Grado, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM), Universidad politécnica de Madrid, 2018.
- 2.27.-2.29., 2.31.-3.36., 2.38.-2.40. Elaboración por el autor con el programa Climate Consultant.
- 2.30. y 2.37. Elaboración del autor.
- 3.1.-3-10- Elaboración del autor.
- 4.1. y 4.8. Tomado de <https://www.archdaily.com/634724/ricola-krauterzentrum-herzog-and-de-meuron>
- 4.2. Tomado de <https://www.search.nl/works/villa-vals/>
- 4.3. Tomado de <https://fernandohigueras.org/>
- 4.4. y 4.9. Tomado de <https://eartharchitecture.org/?p=1400>
- 4.5. Tomado de <https://boltshauser.info/projekt/haus-rauch/>
- 4.6. Tomado de <https://www.archdaily.cl/cl/790384/primary-school-in-gandokere-architecture>
- 4.7. Fotografía por Sandro Livio Straube, tomado de NUSSLI. “Torre de horno, Museo ladrillar de Cham.” NUSSLI, 2021. <https://www.nussli.com/es/proyectos/torre-de-horno-museo-ladrillar-de-cham/#/>