CONAMA 2026

Proyecto nZEB-Mzab

Investigación sobre las técnicas ancestrales de enfriamiento pasivo de la civilización Mzab (Argelia)

CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas — Eduardo Torroja

جامعة الإخوة منتوري قسنطينة ا
Constantine 1 - Frères Mentouri University
Université Frères Mentouri - Constantine 1

U.N

Instituto Cervantes

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE
2026

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor principal: Fernando Martín-Consuegra. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc-CSIC).

Otros autores: Aziz Benhamrouche. Université Frères Mentouri Constantine 1 (UC1)

Yasser Benzagouta. Centre de Recherche en Aménagement du Territoire (CRAT)

Gloria Pérez (IETcc CSIC)

Khedidja Daouadi (CRAT)

Mohameden Taghy. Université de Nouakchott (UN)

Carmen Alonso (IETcc CSIC)

Borja Frutos (IETcc CSIC)

Índice

1. Introducción 4

2. Objetivos 6

3. Caso de Estudio 7

4. Metodología 9

4.1. Catalogación inicial 10

4.2. Análisis territorial y morfológico 11

4.3. Campaña de monitorización 11

4.4. Análisis integrado 12

4.5. Abstracción y transferencia 13

5. Resultados esperados 14

5.1. Catálogo de estrategias pasivas del M'Zab 14

5.2. Base de datos multiescalar 15

5.3. Modelo de cascada microclimática 15

5.4. Identificación de disrupciones contemporáneas 15

5.5. Criterios y directrices de diseño para ciudades mediterráneas 16

6. Conclusiones preliminares 18

Bibliografía 20

Resumen

En el contexto de crisis climática actual nos enfrentamos a la necesidad de encontrar de manera urgente formas de adaptación a las crecientes olas de calor causadas por el Cambio Climático. Los impactos del aumento de la temperatura resultan especialmente graves en las ciudades de la cuenca Mediterránea por el acoplamiento de este efecto con el de la Isla de Calor Urbana.

Las soluciones tradicionales de la arquitectura solar pasiva resultan idóneas para abordar este problema, puesto que se basan en la reducción de la demanda mediante la mejora de la habitabilidad y el confort de los edificios y los espacios urbanos, sin consumo de energía. Un ejemplo mundialmente conocido en este sentido es la arquitectura y el urbanismo del Mzab (Argelia). La arquitectura mozabita es el símbolo de un antiguo conocimiento bioclimático y sus estrategias son generadoras de una perfecta armonía entre clima, hábitat y ocupantes. Constituyen por ello una referencia inspiradora y un ejemplo a disposición de urbanistas, arquitectos y diseñadores.

El proyecto de diplomacia científica “nZEB-Mzab” pretende estrechar lazos entre Argelia, Mauritania y España a partir de la colaboración entre el Centre de Recherche en Amenagement du Territoire (Argelia), las Universidades de Constantine I (Argelia) y Nouakchott (Mauritania), y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, con la participación del Instituto Cervantes como necesario agente facilitador con experiencia en las relaciones entre España y Argelia. En el marco del proyecto se compartirán conocimientos, experiencia y técnicas científicas para la realización de un análisis del comportamiento de los espacios habitados de las ciudades del Mzab. De dicho análisis se pretende obtener conclusiones para la aplicación del conocimiento ancestral a las nuevas ciudades mediterráneas con el objeto de reducir su impacto ambiental y mejorar su adaptación al Cambio Climático.

Palabras clave: arquitectura bioclimática; enfriamiento pasivo; sobrecalentamiento urbano; confort térmico; patrimonio vernáculo; ciudades mediterráneas.

1. Introducción

El calentamiento global está agravando la exposición de las ciudades mediterráneas a temperaturas extremas, olas de calor, sequías y episodios prolongados de sobrecalentamiento. Las proyecciones regionales indican que el Mediterráneo podría calentarse aproximadamente un 20 % más que la media global, con un incremento estival particularmente intenso y una reducción general de las precipitaciones (Lionello & Scarascia, 2018). En las áreas urbanas, este proceso se combina con el efecto de isla de calor, la elevada mineralización del suelo y la pérdida de vegetación, aumentando los riesgos para el confort, la salud y la habitabilidad (MedECC, 2020).

La adaptación del entorno construido no puede descansar exclusivamente en la generalización de sistemas activos de refrigeración. Concretamente, el aire acondicionado contribuye a agravar el problema, ya que reduce la temperatura interior, pero incrementa la demanda eléctrica y expulsa calor residual al espacio urbano. Otro factor agravante en el Mediterráneo meridional y oriental son los procesos recientes de urbanización, que están sustituyendo tejidos climáticamente adaptados por modelos más expuestos a la radiación solar y dependientes de sistemas mecánicos (meetMED, 2024).

El reto energético refuerza la necesidad de actuar primero sobre la demanda. Los edificios representan aproximadamente el 40 % del consumo energético de la Unión Europea y cerca del 80 % de la energía utilizada en los hogares se destina conjuntamente a calefacción, refrigeración y agua caliente. La Directiva revisada de Eficiencia Energética de los Edificios orienta el parque edificado europeo hacia la descarbonización completa en 2050 y sustituirá progresivamente el estándar nZEB por el de edificio de cero emisiones (Comisión Europea, 2024, 2025).

La arquitectura vernácula constituye una fuente de conocimiento para la adaptación climática, pero su interés no puede residir en reproducir sistemas constructivos y formas históricas. El análisis debe identificar los principios espaciales, constructivos, ambientales y sociales que explican su desempeño, considerando conjuntamente la morfología urbana, los materiales y las prácticas de ocupación. Las revisiones recientes sobre ambientes vernáculos argelinos y estrategias pasivas en medios áridos confirman la necesidad de enfoques integrados, sensibles al contexto y centrados en la habitabilidad y el usuario (Ouahchi et al., 2025; Manshour & Lehmann, 2026).

Las estrategias pasivas estabilizan las temperaturas interiores sin trasladar el sobrecalentamiento al exterior a través de consumos mecánicos crecientes. En climas cálidos y secos, su eficacia depende de la combinación entre el control solar, la ventilación y las masas térmicas. La elevada radiación y la amplitud térmica diaria permiten aprovechar la capacidad de almacenamiento de los cerramientos de alta inercia para amortiguar la temperatura interior durante el día, aprovechando las horas frescas de la noche para evacuar el calor acumulado (Bahadori, 1978; Belakehal & Tabet Aoul, 1996, 2000). Juegan un papel fundamental también los espacios intermedios como los patios y verandas, y la regulación microclimática que ofrece el potencial del control de la humedad a través de la vegetación y el agua.

En este marco, el proyecto nZEB–Mzab estudia las técnicas de enfriamiento pasivo ancestrales del valle del M'Zab, evalúa su comportamiento y analiza su transferencia crítica a las ciudades mediterráneas. La propuesta articula además la adaptación climática mediante la reducción de la demanda energética con la conservación patrimonial.

El proyecto pone así en valor el interés del M'Zab, que trasciende su valor patrimonial. Durante el siglo XX, arquitectos y urbanistas, entre ellos Le Corbusier, estudiaron sus ciudades fortificadas (los ksour) como ejemplos de integración entre clima, forma urbana, vivienda y organización social. La historiografía ha examinado tanto su influencia sobre la arquitectura moderna como sus implicaciones coloniales; desde una perspectiva contemporánea, el valle puede entenderse como un laboratorio territorial para estudiar respuestas de baja energía frente a la aridez y la elevada radiación (Bouchair & Dupagne, 2003; Gerber, 1994; Jiménez-Vicario et al., 2021; Velasco Pérez, 2022).

2. Objetivos

El objetivo general de nZEB-Mzab es estudiar, cuantificar y reinterpretar las estrategias ancestrales de enfriamiento pasivo presentes en los ksour del valle del M'Zab, con la finalidad de evaluar su aplicación a la reducción del sobrecalentamiento y de la demanda energética en las ciudades mediterráneas contemporáneas. Este objetivo general se desarrolla mediante los siguientes objetivos específicos:

- Identificar las estrategias pasivas de acondicionamiento térmico utilizadas en la arquitectura vernácula. Integrar el análisis a diferentes escalas, procurando abordar las escalas territorial, urbana, arquitectónica, constructiva, residencial y social. Analizar las interacciones entre sistemas como patios, calles, muros, vegetación o ventilación como mecanismos interdependientes.

- Caracterización del funcionamiento de estas estrategias mediante la identificación de variables mensurables relacionadas con aspectos como el clima, los movimientos del aire, y la gestión de la humedad. Análisis del impacto de la morfología urbana, la arquitectura y los materiales y sistemas constructivos empleados, con especial atención a la gestión de la radiación solar a través de la caracterización termo-óptica de materiales de acabado exterior.

- Valorar el patrimonio del M'Zab como conocimiento climático vivo, reforzando su reconocimiento local y su adaptación a las necesidades contemporáneas.

- Traducir los resultados para el establecimiento de principios de diseño bioclimático aplicables a edificios y tejidos urbanos mediterráneos contemporáneos que sirvan de inspiración a la hora de mitigar el sobrecalentamiento.



Figura 1. Imagen de la arquitectura Mozabita, con sus encalados de alta reflectancia solar. Fuente: UNESCO sf

3. Caso de Estudio

El valle del M'Zab se localiza en el Sahara argelino y está formado por una pentápolis histórica integrada por Ghardaïa, Beni Isguen, Melika, Bou Noura y El Atteuf (Figura 2). Creado a partir del siglo XI por comunidades ibaditas, el conjunto fue inscrito en la Lista del Patrimonio Mundial en 1982 por la estrecha relación entre la arquitectura y la organización social para la adaptación al medio desértico. Palmerales, sistemas hidráulicos, mezquitas, espacios funerarios y tejidos residenciales forman un paisaje cultural que funciona como sistema territorial, no como una suma de edificios autónomos (UNESCO World Heritage Centre, s. f.-a, s. f.-b).

La arquitectura mozabita combina elevada compacidad, calles estrechas y parcialmente cubiertas, viviendas introvertidas, patios, terrazas y cerramientos de gran espesor. Estas configuraciones reducen la exposición directa a la radiación, prolongan las áreas sombreadas y amortiguan la oscilación térmica diaria propia de las condiciones climáticas extremas en las que está implantada. La eficacia del conjunto depende de la interacción entre las partes integrantes de un organismo complejo, por lo que la forma urbana y la vivienda deben analizarse como partes de un mismo sistema ambiental (Bensayah et al., 2019; Matallah et al., 2020). La compacidad de los ksour es coherente con una organización colectiva del hábitat. La proximidad entre viviendas y la transición entre espacios públicos, semiprivados y domésticos articulan la privacidad y la cohesión social con la protección climática. La distribución de la vivienda responde, a su vez, a prácticas familiares y culturales que regulan apropiaciones diferenciadas de los espacios (Adad & Aiche, 2013; Didillon et al., 1977; Lacoste-Dujardin, 2010; Ravéreau, 1981).

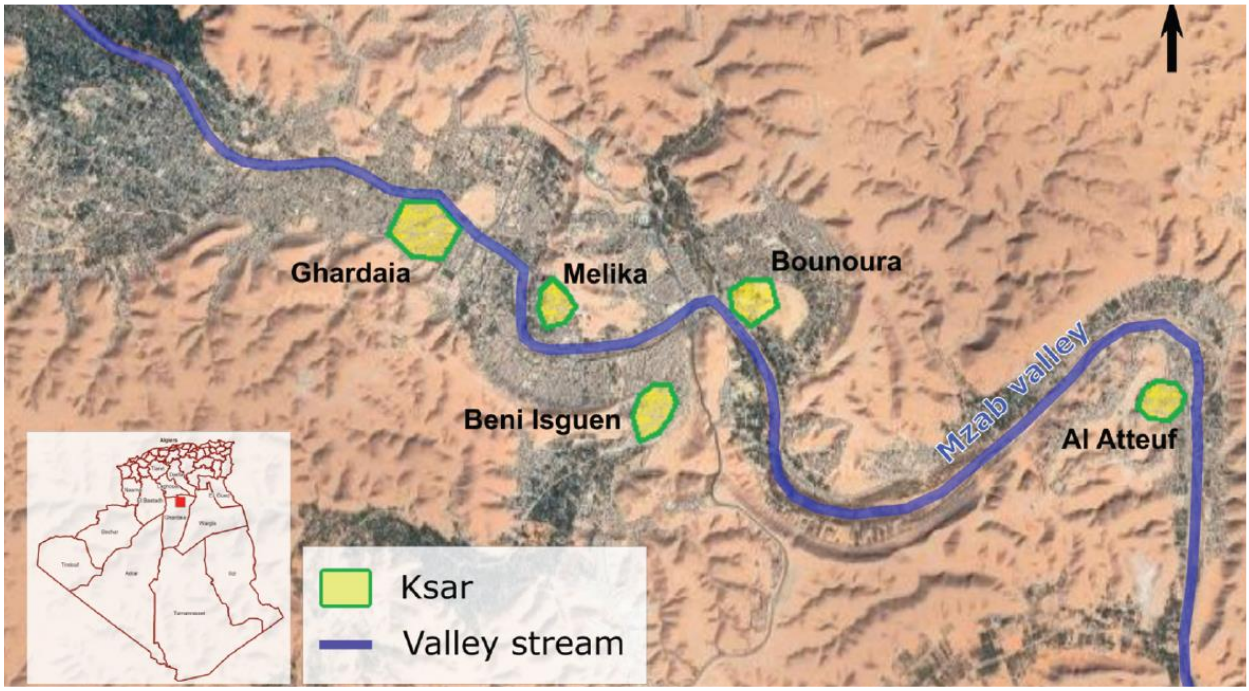


Figura 2. Localización de los principales ksour en el valle del M'Zab (Argelia). Fuente: Mouna y Drias 2023

La inteligencia ambiental del valle incluye también la gestión del agua y la vegetación. Las foggara locales para la irrigación subterránea y los sistemas de captación de aguas torrenciales permiten aprovechar recursos hídricos escasos, almacenarlos y distribuirlos. Por su parte, los palmerales generan sombra, reducen la carga radiante y contribuyen al confort exterior que se traslada a la parte urbanizada (Bahmed & Bouzid-Lagha, 2020; Matallah et al., 2023; Remini et al., 2012).

Diversas investigaciones históricas y ambientales han documentado diferentes aspectos de la organización urbana y doméstica del valle y su cultura constructiva. También se han identificado la aparición de contradicciones y el deterioro del ecosistema urbano causados por la introducción de la modernidad. Mercier (1922), Didillon et al. (1977) y Ravéreau (1981) describieron la estructura de los asentamientos, mientras que Bouchair y Dupagne (2003) y Bouchair (2004) analizaron las tensiones entre tradición constructiva, transformación del tejido y cambio social.

Los ksour son conjuntos habitados que evolucionan y responden a demandas actuales de saneamiento, iluminación, movilidad, telecomunicaciones y otros servicios. La ampliación de huecos en las fachadas, la incorporación de nuevas plantas en los edificios, la reducción del espesor de los muros, la alteración de patios y terrazas y la sustitución de materiales pueden comprometer el desempeño pasivo, aunque deben interpretarse también como respuestas a transformaciones sociales y económicas legítimas (Mouna & Drias, 2024). Otro aspecto importante es que la expansión urbana puede debilitar la continuidad entre organización social, morfología compacta y adaptación ambiental (Adad & Mazouz, 2013). La motorización y las áreas de estacionamiento introducen, además, presiones sobre tejidos concebidos para la movilidad peatonal y la proximidad funcional (Bekhti et al., 2023), mientras que los sistemas contemporáneos de saneamiento y recuperación de recursos deben integrarse sin aumentar la presión sobre el agua y el oasis (Bekaddour et al., 2021).

Sin embargo, experiencias como Tafilalt, un desarrollo urbano contemporáneo basado en los principios tradicionales de los ksour mozabitas, muestran que es posible reinterpretar los principios ancestrales contenidos en los saberes vernáculos (como la compacidad, la cooperación comunitaria o la adaptación climática) sin reducirlos a una reproducción formal (Diafat & Madani, 2019). Esta reinterpretación pone en valor la necesidad de conservar el patrimonio como forma de conocimiento, siempre disponible para su reinterpretación y actualización en función de las tecnologías y herramientas contemporáneas.

4. Metodología

La metodología propuesta combina la revisión bibliográfica con la caracterización territorial y urbana del asentamiento a partir de la colaboración de diferentes grupos de investigación. Se pretende recoger documentación digital de satélite y combinarla con una monitorización in-situ de diferentes aspectos de la calidad ambiental y el confort y la caracterización de materiales de construcción. La primera etapa del análisis, ya iniciada, se orienta al estado del arte, la catalogación, selección de casos y toma de datos. La segunda, abarcará la integración de resultados, el desarrollo y calibración de modelos, la evaluación de escenarios y la transferencia del conocimiento adquirido a partir de las conclusiones del proyecto. Esta secuencia permitirá pasar de la descripción del patrimonio a la verificación de hipótesis mediante evidencia.

La investigación se articula alrededor de la hipótesis del efecto cascada microclimática (Figura 3), entendido como la modificación sucesiva de las condiciones exteriores desde el territorio y el oasis hasta el tejido urbano, que abarca los espacios intermedios, la envolvente y el interior de los edificios. Cada nivel será tratado como un filtro térmico cuyos efectos acumulados se analizarán mediante gradientes de temperatura, humedad, radiación y movimiento del aire (Daouadi, 2026). Por tanto, la unidad de análisis no puede limitarse únicamente al edificio y se estudiarán los gradientes y las relaciones entre:

- territorio y oasis;
- tejido urbano y espacio público;
- edificio y espacios intermedios; envolvente y materialidad;
- ambiente interior y ocupación.



Figura 3. Hipótesis del efecto cascada microclimática desde el territorio hasta el ambiente interior. Fuente: Daouadi (2026), The Mzab Microclimatic Continuum.

4.1. Catalogación inicial

La primera fase se ha iniciado con la realización de una revisión estructurada de la literatura científica y técnica sobre el M'Zab, la arquitectura vernácula argelina y el enfriamiento pasivo. Se estudia la morfología urbana en climas áridos la rehabilitación patrimonial y los materiales tradicionales. La evidencia se clasifica según la escala, el mecanismo físico presente y el método de evaluación, incorporando tanto estudios históricos como trabajos experimentales, simulaciones y revisiones sistemáticas (Ouahchi et al., 2025).

El siguiente paso será caracterizar cada estrategia identificada mediante una ficha de análisis común que permita su comparación y posterior transferencia a contextos contemporáneos. Para cada estrategia se definirá su escala de aplicación (territorial, urbana, arquitectónica, constructiva o social), una descripción de sus características espaciales y funcionales, y el mecanismo físico responsable de su comportamiento bioclimático (sombreado, inercia térmica, ventilación, enfriamiento evaporativo, etc.). Asimismo, se identificarán las variables asociadas que permitan cuantificar su funcionamiento, así como sus interacciones con otras estrategias, teniendo en cuenta que el rendimiento ambiental del sistema Mzab surge de la combinación de múltiples elementos y no de soluciones aisladas. Para cada caso se recopilará la evidencia disponible procedente de la bibliografía, la monitorización in situ y el análisis experimental, evaluando además las posibilidades de cuantificación mediante parámetros medibles. Finalmente, se analizarán las limitaciones para su transferencia a otros contextos climáticos, urbanos o constructivos, con el objetivo de transformar el conocimiento vernáculo en criterios de diseño aplicables a ciudades mediterráneas contemporáneas.

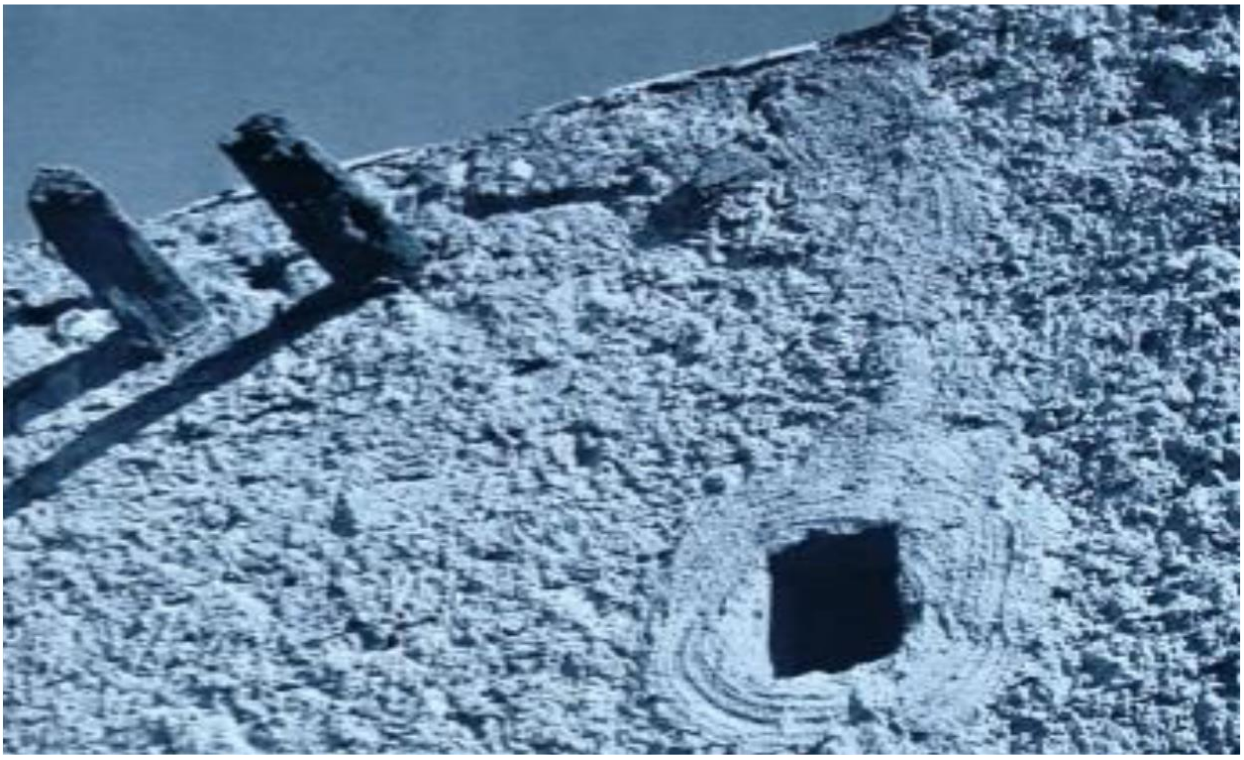


Figura 4. Solución de revestimiento de fachada para maximizar sombreamiento y disipación del calor
Fuente: Bensayah et al., 2019

4.2. Análisis territorial y morfológico

La Universidad de Nouakchott procesará información geoespacial disponible en datos abiertos, incluidos productos Sentinel-2, para elaborar documentación previa y estudiar la implantación territorial y urbana.

El análisis morfológico considerará orientación, densidad, compacidad, configuración parcelaria, relación altura-anchura, factor de visión de cielo, continuidad del sombreado y volumetría. Los resultados se relacionarán con la exposición solar y la ventilación, y se compararán con la posición relativa del ksar, el oasis y los palmerales.

El CRAT realizará documentación patrimonial, levantamientos urbanos y digitalización tridimensional mediante escáner láser. Los modelos tridimensionales y las nubes de puntos permitirán estudiar aspectos de la geometría de las calles, plazas y patios y de los elementos constructivos seleccionados. Esta información se completará mediante el uso de la fotografía para registrar el estado actual del conjunto patrimonial.

La información se complementará con la utilización del dibujo a mano alzada como herramienta de análisis subjetiva. La elaboración de croquis in situ permitirá reconocer relaciones espaciales que no siempre resultan evidentes en una nube de puntos, como la secuencia entre calle, umbral y espacio interior, la jerarquía de recorridos, las transiciones entre luz y sombra o la integración de soluciones constructivas en la forma arquitectónica.

4.3. Campaña de monitorización

La monitorización ambiental será dirigida por la Universidad Constantine 1 con la colaboración del IETcc-CSI. La toma de datos combinará condiciones interiores y exteriores para estudiar la evolución diaria de la envolvente y la capacidad de amortiguación de los sistemas constructivos. La Universidad Constantine 1 definirá la selección y documentación de los puntos de medida. Los puntos de monitorización se distribuirán a lo largo de los diferentes elementos que conforman la cascada microclimática: espacio abierto, oasis o ambiente periurbano, calle, umbral, patio, envolvente y estancias interiores. Esta disposición permitirá reconocer gradientes térmicos y determinar qué transformaciones se producen en cada transición espacial. La instrumentación incluirá termohigrómetros, anemómetros y sensores de calidad ambiental interior para registrar temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y CO_2 . Además, la caracterización de la calidad del aire se completará con mediciones de compuestos orgánicos volátiles, formaldehído y partículas en suspensión. Para la incorporación de las condiciones físicas y de la adaptación conductual y cultural de los ocupantes, las mediciones se complementarán con entrevistas y observación de las prácticas de uso.

El IETcc-CSIC caracterizará la respuesta solar de los materiales tradicionales de revestimiento mediante espectrometría solar y emisometría. Esta información se podrá contrastar con las propiedades de los materiales empleados actualmente. La caracterización termo-óptica se complementará con mediciones de temperaturas superficiales y flujo térmico en muros y cubiertas.

4.4. Análisis integrado

Los diferentes conjuntos de datos recogidos (geomáticos, LIDAR, ambientales, termo-ópticos, constructivos, etc…) se podrán integrar en modelos energéticos de edificios. Cuando la cobertura y calidad de los registros lo permitan, los modelos se calibrarán con datos medidos y se utilizarán para comparar el estado actual con escenarios de rehabilitación, variaciones de las condiciones climáticas futuras y de otras ubicaciones, de las envolventes, los dispositivos de sombra, etc (Figura 5). La zonificación mediante grados-día de refrigeración contribuirá a contextualizar la transferibilidad de las estrategias a otras ubicaciones en la cuenca Mediterránea (Matallah et al., 2025).

La evaluación combinará confort térmico, riesgo de sobrecalentamiento, calidad ambiental y consumo energético. Otros aspectos alternativos que se podrían abordar son la durabilidad, la compatibilidad material, el mantenimiento, y el impacto ambiental, incluyendo además los costes de ciclo de vida y la viabilidad social. El enfoque nZEB priorizará la reducción pasiva de la demanda (*energy efficiency first*) antes de incorporar instalaciones eficientes y energías renovables, especialmente cuando se actúe sobre patrimonio construido (Ibrahim et al., 2021; Ferrari et al., 2026).

El impacto de las transformaciones contemporáneas se estudiará comparando tejidos, viviendas y soluciones constructivas tradicionales que hayan sufrido intervenciones recientes. Se evaluarán cambios en compacidad, sombreado, patios, huecos, materiales, movilidad y climatización. Esta evaluación se podrá relacionar con los indicadores de exposición solar, temperatura, flujo térmico, ventilación, sobrecalentamiento y demanda de refrigeración para determinar el nivel de disrupción con los sistemas tradicionales y sus causas.

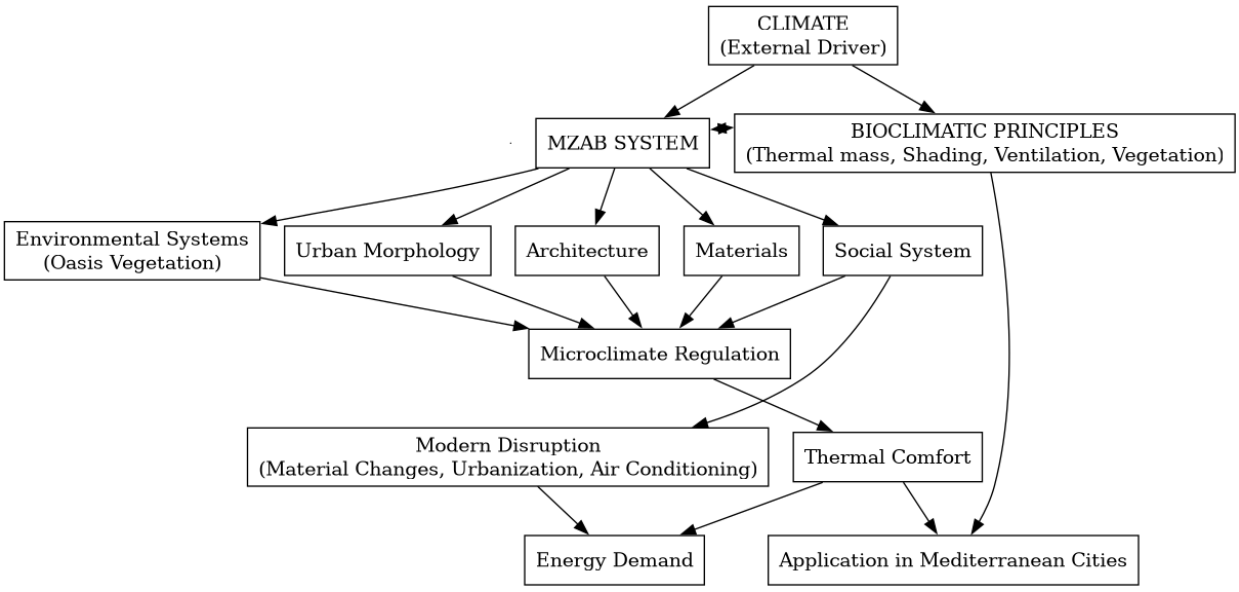


Figura 5. Marco metodológico: relaciones entre sistema pasivo, confort térmico y demanda energética. Fuente: Consorcio nZEB-Mzab (2026)

4.5. Abstracción y transferencia

La fase final tiene como objetivo la traducción de las soluciones documentadas en principios operativos de diseño utilizables en la actualidad. La transferencia se abordará como adaptación crítica del desempeño, no como imitación formal. Para ello se va a tender a abstraer proporciones urbanas, secuencias espaciales y topológicas, y condiciones de materialidad (Figura 6). Se estudiarán las relaciones hueco-muro, las propiedades térmicas de transmisión y acumulación en las envolventes, los criterios de ventilación y los dispositivos de sombra. Estos mecanismos bioclimáticos se vincularán a la infraestructura verde, el agua y el tejido construido. La transferibilidad se evaluará frente a diferencias climáticas, sociales, normativas, económicas y constructivas. Los escenarios combinarán forma urbana y sombra; patios y espacios intermedios; envolvente y huecos; materiales locales de bajo impacto; vegetación y agua compatibles con la disponibilidad hídrica; y tecnologías de control y energía renovable como complemento a la reducción pasiva (meetMED, 2024).

La ejecución del proyecto contribuirá, asimismo, a la valorización social del patrimonio bioclimático del M'Zab, al hacer visible entre la población local el reconocimiento que su cultura, expresada a través de los sistemas constructivos, conocimientos ambientales y prácticas de adaptación climática, reciben en los ámbitos científico y profesional internacionales. Este proceso de retorno y difusión de los resultados podrá reforzar la identificación de la comunidad con su patrimonio, favorecer la transmisión intergeneracional de los saberes tradicionales y promover su conservación activa. En este sentido, el reconocimiento internacional no se plantea únicamente como un mecanismo de divulgación, sino como un instrumento para fortalecer la apropiación local del conocimiento y consolidar su vigencia tratando de encontrar maneras compatibles con las transformaciones urbanas, sociales y tecnológicas contemporáneas.

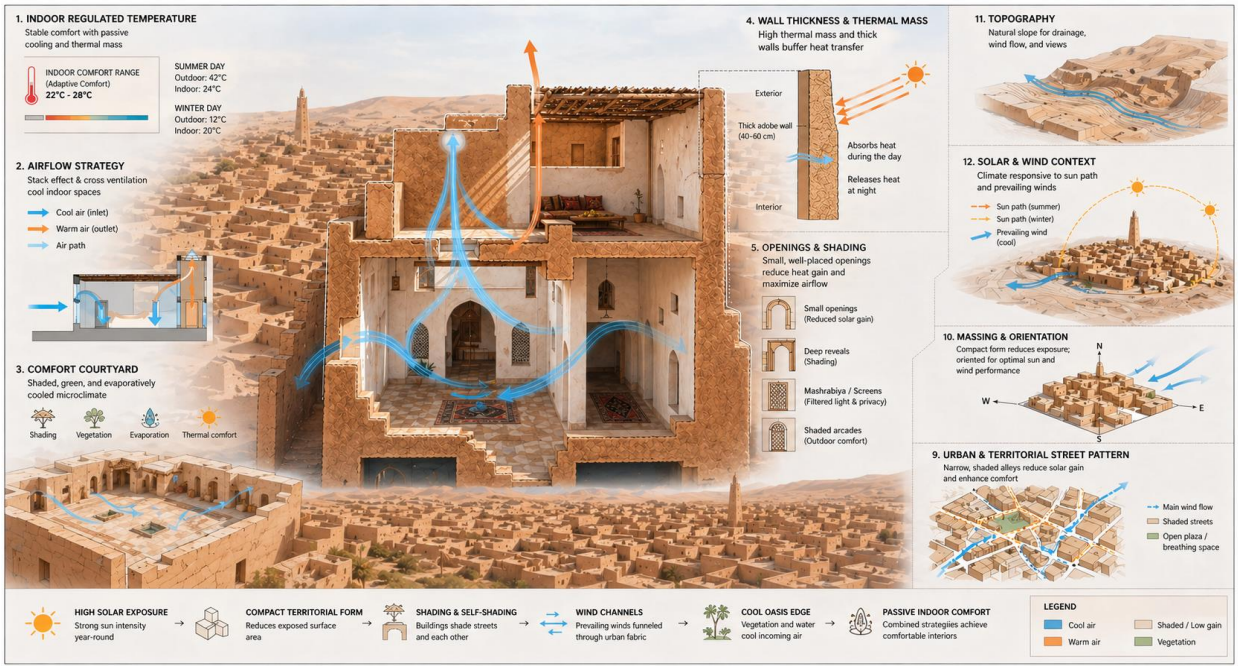


Figura 6. Estrategias de adaptación al contexto climático
Fuente: Khedidja Daouadi, 2026

5. Resultados esperados

Aunque la literatura reconoce ampliamente el valor patrimonial y bioclimático del M'Zab, todavía falta un marco integrado que relacione la evaluación cuantitativa del comportamiento térmico, el conocimiento local, la conservación arquitectónica y la transferencia de estrategias pasivas a otros contextos mediterráneos. El proyecto nZEB-Mzab aborda esta carencia mediante una metodología interdisciplinar que combina documentación, monitorización, simulación y participación local, con el fin de convertir los saberes ancestrales en principios de diseño verificables y modelizables.

5.1. Catálogo de estrategias pasivas del M'Zab

El primer resultado será un catálogo sistemático de estrategias pasivas del M'Zab, organizado por escala territorial, urbana, arquitectónica, constructiva, ambiental y social. Además de las soluciones históricas (Figura 7), incluirá reinterpretaciones contemporáneas como los muros pantalla ventilados, cuya evaluación muestra el potencial de combinar sombreado, masa y ventilación en edificios de baja demanda (Arigue et al., 2023).

El catálogo incorporará también una valoración de su estado de conservación, su vulnerabilidad frente a las transformaciones contemporáneas y su potencial de adaptación a otros contextos. De este modo, constituirá un instrumento operativo para convertir el conocimiento acumulado en el M'Zab en criterios de diseño verificables.

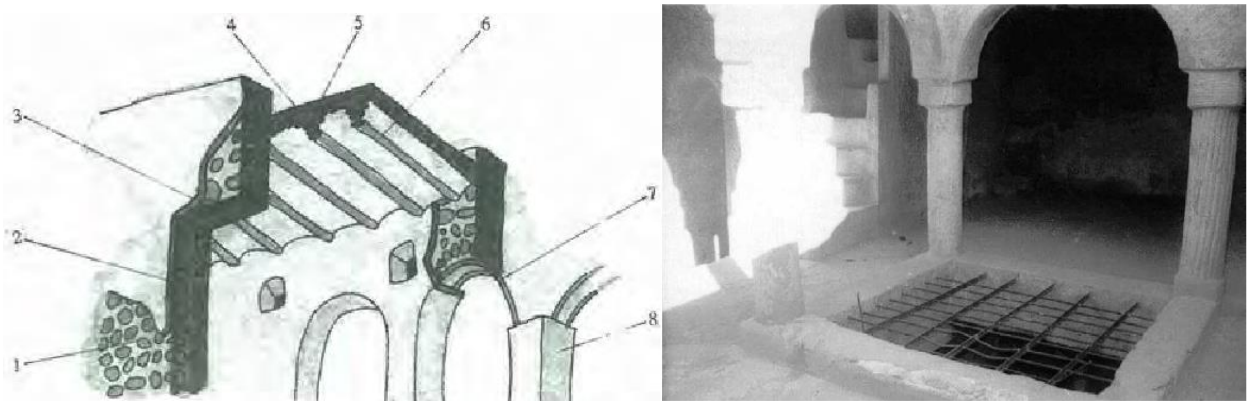


Figura 7. Elementos constructivos diseñados para el enfriamiento pasivo
Fuente: Cataldi, 1996

5.2. Base de datos multiescalar

El segundo resultado será una base de datos multiescalar, interoperable y trazable, con información climática y geoespacial, cartografía, fotografías, dibujos, modelos tridimensionales, nubes de puntos, parámetros morfológicos, propiedades materiales y registros de monitorización. Cada conjunto incorporará metadatos de procedencia, localización, fecha, método, instrumentación, unidades y resolución. Cuando las implicaciones éticas, patrimoniales y de protección de datos lo permitan, la información depurada se publicarán conforme a los principios FAIR para apoyar la conservación preventiva, la reproducibilidad y futuros modelos HBIM o de simulación (Kadri, 2026).

5.3. Modelo de cascada microclimática

El tercer resultado será un modelo multiescalar de cascada bioclimática que describa cómo el estrés térmico se amortigua desde el territorio hasta el ambiente interior. El modelo integrará vegetación y agua, morfología urbana, sombra, patios, ventilación, masa térmica y prácticas adaptativas, superando el análisis de dispositivos aislados.

Su validación podrá combinar los resultados obtenidos de temperatura y humedad, temperatura radiante, flujo y desfase térmico con la velocidad y renovación del aire, el factor de visión de cielo, la relación altura-anchura, horas de sombra e índices de confort. El resultado debe permitir identificar sinergias, localizar rupturas en la continuidad microclimática y convertir relaciones observadas en reglas de diseño transferibles.

5.4. Identificación de disrupciones contemporáneas

El cuarto resultado será una matriz de disrupciones contemporáneas que relacione transformación, escala, componente bioclimático afectado, evidencia disponible y reversibilidad. La comparación entre configuraciones tradicionales y recientes permitirá distinguir impactos derivados de la transformación material y espacial de respuestas legítimas a nuevas necesidades de habitabilidad (Mouna & Drias, 2024).

Las disrupciones se clasificarán en cinco categorías.

- Las territoriales y ambientales, como son la ocupación o degradación de los palmerales, la pérdida de vegetación y la alteración de los sistemas tradicionales de captación, distribución y aprovechamiento del agua.

- Las urbanas y morfológicas incluirán aspectos como la expansión del asentamiento, la pérdida de compacidad, la modificación de la relación entre la altura y la anchura de las calles o la alteración del sombreado mutuo entre edificios.

- Las arquitectónicas y funcionales abarcarán las transformaciones ocurridas en patios, terrazas, huecos y espacios intermedios, así como los cambios en la organización y el uso estacional de las viviendas.

- Las constructivas y de materiales de construcción se referirán a aspectos como la sustitución de materiales locales por productos contemporáneos, la reducción del espesor y de la masa térmica de los cerramientos, y la incorporación de revestimientos modernos, con propiedades físicas y termo-ópticas diferentes.

- Finalmente, las sociales y tecnológicas considerarán los cambios en los modos de habitar, la pérdida de prácticas adaptativas y conocimientos constructivos, la creciente presencia del automóvil y la generalización del aire acondicionado.

La importancia y el nivel de evidencia de cada disrupción se evaluarán mediante documentación histórica y gráfica, observación de campo, levantamiento geométrico, entrevistas a habitantes y agentes locales, y mediciones ambientales y constructivas. Cuando la información disponible lo permita, se compararán indicadores como la exposición solar, las horas de sombra, la temperatura del aire y de las superficies, el flujo térmico, la velocidad del aire, las horas de sobrecalentamiento y el uso de refrigeración mecánica. Esta clasificación facilitará la formulación de recomendaciones realistas de protección, rehabilitación y adaptación, diferenciando entre alteraciones que pueden corregirse mediante intervenciones físicas y aquellas que requieren medidas de gestión, sensibilización o recuperación del conocimiento local.

5.5. Criterios y directrices de diseño para ciudades mediterráneas

Como resultado final, se elaborarán criterios y directrices para edificios y ciudades mediterráneas, orientados a compacidad y sombra, patios y espacios intermedios, control de huecos, ventilación nocturna, masa térmica, materiales de bajo impacto, infraestructura verde y gestión eficiente del agua. La investigación previa sobre viviendas del M’Zab muestra que ampliar patios puede mejorar la luz natural, mientras que aumentar indiscriminadamente el acristalamiento, especialmente a este y oeste, eleva las ganancias solares; por ello, las recomendaciones combinarán iluminación, confort y demanda de refrigeración (Boufendassa et al., 2026). Las directrices se formularán para rehabilitación y obra nueva y equilibrarán eficiencia, confort, reversibilidad, seguridad higrotérmica y conservación patrimonial. Este enfoque es coherente con la transición hacia edificios de cero emisiones y con la prioridad de reducir la demanda antes de dimensionar sistemas activos (Commission européenne, 2024, 2025; Ibrahim et al., 2021).

La Tabla 1 sintetiza las principales estrategias objeto de investigación y su correspondencia con los mecanismos físicos, las variables de análisis y los resultados esperados.

Tabla 1. Estrategias bioclimáticas y resultados esperados en el proyecto nZEB-Mzab.

Escala	Estrategia	Mecanismo ppal.	Variables	Resultados
Territorial	Integración ksar-oasis-palmeral	Sombra, evapotranspiración y preacondicionamiento del aire	Temperatura, humedad, radiación, cobertura vegetal y agua	Cuantificación del efecto regulador del oasis y criterios para infraestructura verde y azul
Territorial	Gestión tradicional del agua	Mantenimiento de vegetación y enfriamiento evaporativo	Distribución del agua, humedad y temperatura superficial	Identificación de los sistemas hídricos como infraestructura microclimática
Urbana	Compacidad del tejido	Menor superficie expuesta y sombreado mutuo	Densidad, compacidad, relación superficie-volumen y SVF	Parámetros urbanos para reducir exposición solar y sobrecalentamiento
Urbana	Calles estrechas y parcialmente cubiertas	Control de radiación y canalización del aire	Relación H/W, orientación, horas de sombra, temperatura y viento	Geometrías urbanas favorables para el confort exterior
Arquitectónica	Patio central y espacios intermedios	Sombreado, ventilación y extracción del aire caliente	Geometría, orientación, temperaturas, aire y radiación	Configuraciones de patio aplicables a edificios contemporáneos
Arquitectónica	Orientación y control de huecos	Reducción de ganancias solares y regulación de ventilación	Orientación, tamaño de huecos, radiación y caudal de aire	Criterios para fachadas adaptadas a climas cálidos
Arquitectónica	Ventilación natural y nocturna	Evacuación del calor y enfriamiento de la masa	Velocidad del aire, ACH y diferencia interior-exterior	Potencial de reducción del sobrecalentamiento y refrigeración
Constructiva	Muros de elevada masa térmica	Amortiguación y desfase de la onda térmica	Espesor, conductividad, capacidad térmica, flujo y desfase	Contribución de la inercia a la estabilidad interior
Constructiva	Revestimientos claros	Reflexión solar y menor temperatura superficial	Reflectancia, emisividad, color y temperatura superficial	Propiedades termo-ópticas adecuadas para envolventes
Social	Uso adaptativo y estacional	Ajuste de horarios, actividades y ocupación	Patrones de ocupación, espacios utilizados y percepción	Integración del comportamiento en el confort adaptativo
Social y	Transmisión del conocimiento tradicional	Mantenimiento de prácticas adaptadas al clima	Técnicas locales, percepción, participación y mantenimiento	Valorización del patrimonio como conocimiento climático vivo
Transversal	Disrupciones contemporáneas	Pérdida de regulación pasiva	Materiales, patios, huecos, expansión y aire acondicionado	Procesos que incrementan sobrecalentamiento y dependencia energética
Transversal	Secuencia exterior-intermedio-interior	Atenuación progresiva mediante cascada microclimática	Gradientes de temperatura, humedad, radiación y velocidad del aire	Validación inicial del modelo de cascada microclimática

Fuente: elaboración propia a partir de datos del consorcio nZEB-Mzab

6. Conclusiones preliminares

El estado del arte y el diseño metodológico permiten establecer, con carácter preliminar, que el valor bioclimático del M'Zab no reside en la aplicación aislada de determinados dispositivos, sino en la integración del territorio con la urbanización. Para ello se establecen una serie de mecanismos multiescalares integrados que van desde el oasis, pasando por la morfología urbana, la arquitectura y los materiales, hasta las prácticas sociales. La compacidad de los ksour, el sombreado continuo, los patios y espacios intermedios, la masa térmica, la ventilación natural y la gestión del agua y la vegetación configuran un sistema ambiental coherente, adaptado a la aridez y a la elevada amplitud térmica diaria.

Esta lectura sistémica sustenta la hipótesis de la cascada microclimática: las condiciones exteriores son modificadas sucesivamente desde el territorio hasta el ambiente interior por una secuencia de filtros espaciales y materiales. La campaña de monitorización y el análisis integrado deberán determinar la contribución relativa de cada escala, cuantificar las sinergias entre estrategias y comprobar hasta qué punto el efecto acumulado explica la moderación del estrés térmico y la reducción de la demanda de refrigeración.

La revisión también señala que las transformaciones contemporáneas no deben interpretarse de forma homogénea. Algunas responden a necesidades legítimas de los avances en habitabilidad de las sociedades modernas (saneamiento, movilidad,..). En cambio, otras se pueden deber a percepciones equivocadas, como por ejemplo que los materiales importados (cemento, hormigón, etc.…) funcionan mejor que los tradicionales o a una desregulación o falta de protección efectiva (por ejemplo, la construcción de viviendas en los palmerales). Ambas pueden debilitar el funcionamiento pasivo mediante la pérdida de compacidad y sombra, la alteración de patios, el sellado de huecos, la sustitución de materiales, la degradación de los palmerales o la dependencia del aire acondicionado. La comparación entre configuraciones tradicionales y recientes permitirá distinguir impactos, necesidades de adaptación y posibilidades de reversión sin idealizar el modelo histórico.

La principal contribución prevista de nZEB–Mzab será transformar este conocimiento vernáculo en evidencia verificable y transferible. El catálogo de estrategias, la base de datos multiescalar, los modelos calibrados y la matriz de disrupciones proporcionarán una estructura común para relacionar mecanismos físicos, condiciones de uso, prestaciones ambientales y compatibilidad patrimonial. Esta base permitirá formular criterios de diseño y rehabilitación aplicables a contextos mediterráneos, priorizando la reducción pasiva de la demanda antes de incorporar sistemas activos y energías renovables. La transferencia deberá realizarse como adaptación crítica del desempeño y no como reproducción formal de la arquitectura mozabita. Su viabilidad dependerá de las condiciones climáticas, hídricas, normativas, económicas y socioculturales de cada contexto, así como de la participación de la población local. En este sentido, el proyecto vincula innovación climática y valorización patrimonial: la documentación y discusión de los resultados con los agentes del valle contribuirán a reconocer los saberes del M'Zab como un recurso contemporáneo para la resiliencia urbana, favoreciendo su conservación activa y su transmisión intergeneracional.

Estas conclusiones son necesariamente provisionales, ya que deberán contrastarse con las campañas de campo, la caracterización material, la monitorización ambiental y la simulación previstas. No obstante, proporcionan un marco científico consistente para evaluar la arquitectura vernácula como infraestructura de conocimiento y para explorar su contribución a edificios de muy baja demanda y ciudades mediterráneas mejor adaptadas al sobrecalentamiento.

Bibliografía

Adad, M. C., & Aiche, M. (2013). L'influence des pratiques sociales mozabites sur l'organisation de l'espace ksourien. Faire la ville, 13(1), 19–33.

Adad, M. C., & Mazouz, M. T. (2013). Les anciens et nouveaux ksour : étude comparative. Cas du M'Zab. Courrier du Savoir, 16, 77–87.

Arigue, B., Sriti, L., Santi, G., Khadraoui, M. A., & Bencheikh, D. (2023). Exploring the cooling potential of ventilated mask walls in neo-vernacular architecture: A case study of André Ravéreau's dwellings in M'zab Valley, Algeria. Buildings, 13(4), 837. https://doi.org/10.3390/buildings13040837

Bahadori, M. N. (1978). Passive cooling systems in Iranian architecture. Scientific American, 238(2), 144–154. https://doi.org/10.1038/scientificamerican0278-144

Bahmed, A. T., & Bouzid-Lagha, S. (2020). Quantitative analysis and efficiency assessment of floodwater harvesting system in arid region: Case of Touzouz ephemeral stream—Mzab Valley. Water Resources, 47(1), 54–64. https://doi.org/10.1134/S0097807820010029

Bekaddour, S., Ait-Mouheb, N., & Hartani, T. (2021). Re-emergence of dry toilets and fecal nutrient reuse in M'zab cities. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 11(6), 983–993. https://doi.org/10.2166/washdev.2021.115

Bekhti, C., Alkama, D., & Bensehla, S. (2023). The impact of parking lots on sustainable mobility in the Mzab Valley (Algerian Sahara): Preliminary results of field observations. Bulletin of the Serbian Geographical Society, 103(2), 67–90. https://doi.org/10.2298/GSGD2302067B

Belakehal, A., & Tabet Aoul, K. (1996). Shading and shadowing: Concepts for an interactive strategy between solar control and aesthetics in the design of the facade. Reference to arid zones. Renewable Energy, 8(1–4), 323–326. https://doi.org/10.1016/0960-1481(96)88870-7

Belakehal, A., & Tabet Aoul, K. (2000). An experimental assessment of shading and shadowing strategy, case of facade's cantilevered volumes: Reference to dwellings in arid lands. International Journal of Ambient Energy, 21(4), 179–186. https://doi.org/10.1080/01430750.2000.9675372

Bensayah, A., Bencheikh, H., & Abdessemed, A. (2019). Mzabite heritage in Southern Algeria: What bioclimatic lessons can be learned to optimize thermal comfort? MATEC Web of Conferences, 278, 04005. https://doi.org/10.1051/matecconf/201927804005

Bouchair, A. (2004). Decline of urban ecosystem of Mzab Valley. Building and Environment, 39(6), 719–732. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2003.12.001

Bouchair, A., & Dupagne, A. (2003). Building traditions of Mzab facing the challenges of re-shaping of its built form and society. Building and Environment, 38(11), 1345–1364. https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00065-9

Boufendassa, R., Yang, W., Liu, X., & Mashrah, W. A. H. (2026). Optimising daylight performance in Mzab houses: Enhancing window and courtyard areas in Algeria's hot

climate. Ain Shams Engineering Journal, 17(6), 104171. https://doi.org/10.1016/j.asej.2026.104171

Commisión Europea. (2024). Energy Performance of Buildings Directive. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en

Commisión Europea. (2025). Nearly-zero energy and zero-emission buildings. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/nearly-zero-energy-and-zero-emission-buildings_en

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. (2026). nZEB-Mzab: Research on ancestral passive cooling techniques of the Mzab civilization and their application to mitigate overheating in contemporary Mediterranean cities.

Consorcio nZEB–Mzab. (2026c). nZEB–Mzab project kick-off [Presentación no publicada].

Daouadi, K. (2026). The Mzab microclimatic continuum: From territorial morphology to indoor thermal regulation [Presentación no publicada]. Centre de Recherche en Aménagement du Territoire.

Diafat, A., & Madani, S. (2019). Tafilalt in the Mzab Valley—Algeria: A sustainable urban project in arid environment. urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana, 11, e20190023. https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190023

Didillon, H., Didillon, J.-M., Donnadieu, C., & Donnadieu, P. (1977). Habiter le désert: Les maisons mozabites. Recherches sur un type d'architecture traditionnelle pré-saharienne. Pierre Mardaga.

Ferrari, S., Maestrello, M., Croci, L., & Cardelli, R. (2026). Balancing efficiency and conservation: A review of energy retrofitting approaches for historical buildings in the Mediterranean context. Energies, 19(14), 3353. https://doi.org/10.3390/en19143353

Gerber, A. (1994). Le Corbusier et le mirage de l'Orient: L'influence supposée de l'Algérie sur son œuvre architecturale. Revue du monde musulman et de la Méditerranée, 73–74, 363–378. https://doi.org/10.3406/remmm.1994.1688

Ibrahim, H. S. S., Khan, A. Z., Serag, Y., & Attia, S. (2021). Towards nearly-zero energy in heritage residential buildings retrofitting in hot, dry climates. Sustainability, 13(24), 13934. https://doi.org/10.3390/su132413934

Jiménez-Vicario, P. M., Ródenas-López, M. A., & Mestre-Martí, M. (2021). De las granjas del Jura al valle de M'Zab: Influencias de lo vernáculo en Le Corbusier. Estoa, 10(20), 123–146. https://doi.org/10.18537/est.v009.n020.a07

Junara, N., & Sugeng, T. S. (2018). Spatial pattern of Islamic settlements of Kampung Kauman Malang in the perspective of typical Mzab. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 213, 012038. https://doi.org/10.1088/1755-1315/213/1/012038

Kadri, M. (2026). Integrating HBIM for the sustainable management of the M'zab Valley of Algeria: A digital approach to earthen heritage in arid climates. VITRUVIO—International Journal of Architectural Technology and Sustainability. https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2026.25132

Lacoste-Dujardin, C. (2010). Des femmes au Maghreb: Regards d'une ethnologue sur cinquante ans d'études et de recherches. Hérodote, 136(1), 76–99. https://doi.org/10.3917/her.136.0076

Lionello, P., & Scarascia, L. (2018). The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. Regional Environmental Change, 18, 1481–1493. https://doi.org/10.1007/s10113-018-1290-1

Manshour, S., & Lehmann, S. (2026). A systematic review of passive cooling strategies integrating traditional wisdom and modern innovations for sustainable development in arid urban environments. Discover Cities. https://doi.org/10.1007/s44327-026-00204-4

Matallah, M. E., Ahriz, A., Zitouni, D. C., Arrar, H. F., Ben Ratmia, M. A. E., & Attia, S. (2023). A methodological approach to evaluate the passive cooling effect of oasis palm groves. Sustainable Cities and Society, 99, 104887. https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104887

Matallah, M. E., Alkama, D., Ahriz, A., & Attia, S. (2020). Assessment of the outdoor thermal comfort in oases settlements. Atmosphere, 11(2), 185. https://doi.org/10.3390/atmos11020185

Matallah, M. E., Matzarakis, A., Boulkaibet, A., Ahriz, A., Zitouni, D. C., Ben Ratmia, F. Z., Mahar, W. A., Ghanemi, F., & Attia, S. (2025). Refining climate zoning in North Africa: A 30-year analysis of heating and cooling degree days for energy planning and adaptation. Energy and Buildings, 115852. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115852

MedECC. (2020). Climate and environmental change in the Mediterranean Basin: Current situation and risks for the future. First Mediterranean Assessment Report.

meetMED. (2024). Challenges and methods for cooling cities and buildings in Southern and Eastern Mediterranean countries. MEDENER & RCREEE.

Mercier, M. (1922). La civilisation urbaine au Mzab: Étude de sociologie africaine. Imprimerie Pfister.

Mouna, H., & Drias, A. (2024). A socio-environmental analysis of contemporary modifications to Algerian Mzab traditional houses. African Geographical Review. https://doi.org/10.1080/19376812.2024.2318747

Ouahchi, S., Ab Ghafar, N., Mohd Sahabuddin, M. F., Zemmouri, N., Mahaya, C., & Priya, R. S. (2025). Thermal comfort in Algeria's vernacular built environment: A systematic review. International Journal of Environmental Studies. https://doi.org/10.1080/00207233.2025.2480511

Ravéreau, A. (1981). Le M'Zab, une leçon d'architecture. Sindbad.

Remini, B., Achour, B., Ouled Belkhir, C., & Baba Amar, D. (2012). The Mzab foggara: An original technique for collecting the water rising. Journal of Water and Land Development, 16, 49–53. https://doi.org/10.2478/v10025-012-0024-x

UNESCO World Heritage Centre. (s. f.-a). M'Zab Valley. https://whc.unesco.org/en/list/188

UNESCO World Heritage Centre. (s. f.-b). Safeguarding and development of the M'Zab Valley and its five fortified ksour. https://whc.unesco.org/en/activities/768

Velasco Pérez, Á. (2022). The Algerian Sphinx: Le Corbusier's other colonialism in the M'Zab. The Journal of Architecture, 27(2–3), 322–345. https://doi.org/10.1080/13602365.2022.2104911