

Arquitectura, Sostenibilidad, Resiliencia y Salud

Hacia una Sociedad en Armonía con el Medio Ambiente

*Architecture, Sustainability,
Resilience and Health*

Towards a Society in Harmony with the Environment

Dr. José Roberto García Chávez
Coordinador

Universidad Autónoma Metropolitana

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Rector General

Dra. Norma Rondero López

Secretaria General

Unidad Azcapotzalco

Dra. Yadira Zavala Osorio

Rectora de la Unidad

Mtro. Salvador Ulises Islas Barajas

Secretario de la Unidad

Mtra. Areli García González

Secretaria Académica en funciones de Directora de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtro. Luis Yoshiaki Ando Ashijara

Jefe del Departamento de Medio Ambiente

Consejo Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtra. Dulce María Lomelí. Presidenta

Mtra. Alma Olivia León Valle. Secretaria

Dra. Olivia Fragoso Susunaga

Dr. Christof Adolf Göbel

Mtra. Gabriela García Armenta. Experta editorial

Comité Editorial de la División de Ciencias y Artes para el Diseño

Mtra. Bárbara Paulina Velarde Gutiérrez. Presidenta

Dr. Isaac Acosta Fuentes. Secretario

Dra. Sandra Rodríguez Mondragón

MDT. Gabriel de la Cruz Flores Zamora

Dr. Fernando Rafael Minaya Hernández.

Dr. José Roberto García Chávez

Coordinador

D. C. G. Lilian Alejandra Ortiz Moreno

Diseño de portada y formación editorial

Arquitectura, Sostenibilidad, Resiliencia y Salud. Hacia una Sociedad en Armonía con el Medio Ambiente

Architecture, Sustainability, Resilience and Health. Towards a Society in Harmony with the Environment

Primera Edición, 2024

ISBN versión digital: 978-607-28-3162-9

D.R. © 2024 Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco División de Ciencias y Artes para el Diseño

Departamento de Medio Ambiente | Grupo de Investigación Arte

Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco. C.P. 02128, CDMX.

Queda prohibida la reproducción parcial o total, directa o indirecta, del contenido de la presente obra, sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito del editor, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor, y en su caso de los tratados internacionales aplicables. La persona que infrinja esta disposición, se hará acreedora a las sanciones legales correspondientes.



Arquitectura, Sostenibilidad, Resiliencia y Salud

Hacia una Sociedad en Armonía con el Medio Ambiente

***Architecture, Sustainability,
Resilience and Health***

***Towards a Society in Harmony
with the Environment***

Dr. José Roberto García Chávez

Coordinador

Índice

6	<i>Prólogo</i>
8	<i>Introducción</i>
13	<i>Capítulo 1</i> Cambio Climático y Salud: Retos de Adaptación al Aumento de Temperaturas en la Arquitectura <i>Miguel Ángel Navas Martín, José Antonio López Bueno, Cristina Linares Gil, Julio Díaz Jiménez & Maria Teresa Cuervo Vilches</i>
25	<i>Capítulo 2</i> El Teletrabajo, Tarea Doméstica: Alcances Ambientales, Sociales y Económicos en Entornos Urbanos <i>Maria Teresa Cuervo Vilches, Miguel Ángel Navas Martín, Maribel Jaimes Torres & Mónica Aguilera Portillo</i>
43	<i>Capítulo 3</i> Incidencia de los Extremos Térmicos Sobre la Mortalidad Diaria a Diferentes Escalas en España: Análisis Comparado entre las Áreas Rurales y Urbanas <i>José Antonio López Bueno, Julio Díaz Jimenez, Cristina Linares Gil & Miguel Ángel Navas Martín</i>
57	<i>Capítulo 4</i> Addressing Energy Poverty in the European Union: Analysing policies, identifying challenges, and mobilizing local solutions in Portugal <i>João Pedro Costa Luz Baptista Gouveia, Sandra Salomé Neto Bessa, Katherine Elizabeth Mahoney, Pedro Mendes Aleluia Martins da Palma & Miguel Macias Marques Sequeira</i>
91	<i>Capítulo 5</i> Cosmo-Convivencia Armónica desde la Compresión Andina <i>Pacha Yapucha Yampara Blanco</i>
103	<i>Capítulo 6</i> Categorisation of Land Surface Temperature, built-up, and vegetation behaviour at neighbourhood scale: Application of remote sensing methods and cadastral data <i>Karina Angélica García Pardo, Samuel Domínguez Amarillo, David Manuel Moreno Rangel & José Roberto García Chávez</i>
129	<i>Capítulo 7</i> Nanotechnology Applications for Sustainable Architecture <i>Eduardo Hernández Silva & Cecilia Bañuelos Barrón</i>

- 149** *Capítulo 8*
La Captación de Agua de Lluvia en la Ciudad de México: una Alternativa para Mejorar el Acceso
Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez , Jorge Gabriel Vázquez Arenas, Arely Rivero Jaimes & Armando Nava Arias
- 175** *Capítulo 9*
Situación Actual del Uso de los Sistemas de Aire Acondicionado en los Edificios. Alternativas Bioclimáticas Sostenibles y Resilientes para Mitigar el Cambio Climático
José Roberto García Chávez
- 191** *Capítulo 10*
La Cal como Material para la Construcción de una Sociedad más Comprometida con el Cuidado del Medio Ambiente
Maria del Rosario Tovar Alcázar
- 201** *Capítulo 11*
Problemas de Drenaje Pluvial en Ciudades con Suelo Kárstico, Caso: Propuestas de Solución para la Ciudad de Mérida, Yucatán, México
José Rogelio Pérez Monsreal, Zenón Medina Domínguez & José Antonio Peniche Gallareta
- 223** *Capítulo 12*
Sistemas y Geometrías de Techos para Mitigar la Formación de Islas de Calor Urbano
Yarandy Georgina Padilla Manrique e Inocente Bojórquez Báez
- 243** *Capítulo 13*
Perspectiva Integral para el Desarrollo Sostenible, en Armonía con las Condiciones Climáticas, Sociales y Económicas del Hábitat Tradicional en la Región del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca
Hernán Laguna Rodríguez

Prólogo

En julio del 2023 António Guterres, Secretario General de la ONU, anunciaba que “el Cambio Climático está aquí. Es aterrador. Y esto es sólo el principio. La era del Calentamiento Global ha terminado, ahora es el momento de la era de la ebullición global.” Agosto del 2023 rompió récords de temperatura, octubre y noviembre lo mismo. El 2023 ha sido el año más caliente de la historia, pero de seguir con esta tendencia, será al mismo tiempo el año menos cálido para registros futuros. Guterres no se equivocaba, la ciencia es clara, estamos ya en una crisis climática, y con ella estamos alcanzando “puntos de no retorno” que nos ponen como humanidad en una situación climática más crítica.

La crisis climática trastoca todo y a todos. Es ya una causa de desplazamientos y crisis humanitarias. Específicamente México es un país vulnerable a los embates del Cambio Climático, en parte por su geografía, pero mucho por la falta de acciones de mitigación y adaptación. La temporada de huracanes del 2020 en el Atlántico en la que 4 sistemas tropicales tocaron tierra en la Península de Yucatán, dejaron zonas anegadas, pérdidas de cultivos, daños a infraestructura; y por la movilización que se tuvo que hacer, dejó expuestas a comunidades enteras al COVID19. En el 2023, la temporada de huracanes, pero ahora en la cuenca del Pacífico, fue una de las más devastadoras, con el huracán Otis, golpeando Acapulco, con una fuerza nunca registrada en esa cuenca, lo que puso en manifiesto la fragilidad de las comunidades costeras y más cuando desarrollos turísticos masivos no se diseñan ni construyen considerando a la naturaleza que nos protege de los embates del Cambio Climático y no se toman en cuenta las condiciones climáticas ni la ciencia. Pero no sólo los huracanes afectan a nuestro vasto y diverso país. Las sequías en el noroeste del país se están haciendo más intensas y severas con el Calentamiento Global. Al mismo tiempo, se registran lluvias torrenciales como la registrada del 2021 en Tula, Hidalgo. Todos estos fenómenos climáticos se están volviendo más intensos y más frecuentes con cada aumento de la temperatura.

Somos parte del problema y debemos ser parte de la solución. Sabemos que se requiere hacer para evitar un futuro más desolador: descarbonizar la economía, y una transición justa a energías renovables. Si bien la quema de combustibles fósiles, sobre todo para la producción de electricidad, es uno de los sectores que más contribuyen, el sector de la construcción le sigue con un 21% a nivel global. De ese porcentaje el 27% son emisiones directas, 18% son emisiones asociadas al cemento y al acero y el resto son emisiones indirectas (por otros procesos industriales, por la deforestación asociada a la urbanización, entre otros).

De ahí la importancia y trascendencia del contenido de este libro, en el que agrupan esfuerzos, análisis, investigaciones y proyectos para reducir las emisiones asociadas a este sector. Así como trayectorias innovadoras para una nueva arquitectura orientada hacia un futuro sostenible, y al mismo tiempo considerando las experiencias exitosas ancestrales de la arquitectura tradicional.

En resumen, si la crisis climática nos afecta a todos, la única manera de enfrentarla es trabajando juntos para lograr una justicia climática y ambiental; por lo tanto, nos toca a todos hacerle frente desde cada una de nuestras trincheras.

Dra. Ruth Cerezo-Mota

Integrante del Grupo Intergubernamental de Expertos Internacionales sobre el Cambio Climático. (IPCC.)

Introducción

Desde las primeras manifestaciones del hombre en el planeta, la energía ha estado presente en sus diversas actividades. En un principio las principales fuentes de energía utilizadas fueron el sol, el metabolismo muscular, la biomasa, la madera, el viento y la cinética del agua. La mayor parte de los recursos energéticos del planeta proviene de la irradiación solar que llega a la Tierra, y parte de esta energía ha sido almacenada históricamente en forma de energía fósil; otra parte es utilizada directa o indirectamente como una forma de energía solar, eólica, hidroenergética, geotérmica y oceánica (maremotriz, olas y gradiente térmico), entre otras.

Con el surgimiento de la Revolución Industrial, un episodio de cambio tecnológico y social que tuvo lugar originariamente en Inglaterra a partir de la mitad del siglo XVIII, se inició la explotación y uso del carbón. Esta situación provocó el inicio de la contaminación ambiental. Actualmente el consumo de energía global proviene en su mayoría de la quema de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural, y la subsecuente emisión de los gases de efecto invernadero (GEI), lo que a su vez ha provocado el calentamiento global (CG), y el Cambio Climático (CC), detonando un severo deterioro ambiental con nocivas consecuencias.

Además, la mayor parte de la energía comercialmente disponible del planeta se consume en las edificaciones, para satisfacer los requerimientos de climatización e iluminación artificiales, para calentamiento de agua, cocción de alimentos, entre otros. Estas necesidades pueden ser cubiertas por medio de la aplicación de sistemas pasivos de arquitectura bioclimática y con la integración de sistemas sostenibles, con base en la utilización de las energías renovables (ER).

En este contexto, las acciones de la Unión Europea (UE) se han materializado a partir del establecimiento de iniciativas, con el objetivo de lograr un liderazgo global, enfocadas a mitigar el deterioro del medio ambiente y del Cambio Climático, que afectan el planeta, y a mejorar la economía, la calidad de vida y la salud de los habitantes. Es en esta misma dirección, que en la presente obra se integran los trabajos de investigadores de reconocido prestigio internacional que forman parte de la Red LINGLOBAL auspiciado por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de España, que tiene como objetivo favorecer la interacción entre investigadores iberoamericanos y españoles en el ámbito de la energía, la sostenibilidad, la resiliencia y el Cambio Climático, a la vez que se avanza en la consecución de la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), así como en los planes y programas a 2050, particularmente en lograr edificios y ciudades con nulo o muy bajo consumo de energía (NZEB), y llevar a cabo una efectiva “descarbonización” y gradual sustitución de las energías provenientes de los combustibles fósiles por energías renovables. La descarbonización es uno de los principales retos a los que se enfrenta la sociedad en general y el sector energético en particular en la lucha contra el Cambio Climático.

Así mismo, estos trabajos se complementan con los presentados por diversos investigadores de reconocido prestigio a nivel nacional e internacional, que participaron en el Congreso Internacional realizado en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco en el mes de mayo del presente.

En resumen, con la aplicación en los edificios y las ciudades de sistemas bioclimáticos, complementados con sistemas sostenibles de ER, y medidas de eficiencia energética, es viable mitigar los efectos del CC y revertir la situación del severo deterioro ambiental por medio de acciones efectivas de resiliencia, orientadas a proyectar un mejor hábitat para las presentes y futuras generaciones.

En este libro, como parte de los objetivos y alcances específicos planteados anteriormente, se incluyen trece capítulos.

El primero, intitulado: Cambio Climático y Salud: Retos de Adaptación al Aumento de Temperaturas en la Arquitectura, de Miguel Ángel Navas Martín, José Antonio López Bueno, Cristina Linares, Julio Díaz y Teresa Cuervo Vilches; se destaca la importancia del Cambio Climático y su impacto en la salud humana, específicamente en su relación con el Calentamiento Global y se resume que la construcción de edificios eficientes y la rehabilitación de viviendas pueden contribuir a reducir los efectos del calentamiento, disminuyendo así su impacto en la salud de quienes residen en ellos.

El segundo, intitulado: El Teletrabajo, Tarea Doméstica: Alcances Ambientales, Sociales y Económicos en Entornos Urbanos, de Teresa Cuervo-Vilches, Miguel Ángel Navas-Martín, Maribel Jaimes y Mónica Aguilera; se refiere a que el teletrabajo, home office o trabajo en remoto, es una modalidad laboral con desigual respuesta a nivel global, sin embargo, la irrupción de la pandemia por COVID-19 y las consecuentes medidas de precaución aplicadas a nivel mundial (confinamientos principalmente) transformaron la vida en los hogares, incluyendo el ámbito profesional. Los resultados se enfocan en adoptar esta modalidad de trabajo al menos en forma híbrida o mixta, favoreciendo al medio ambiente y la posible cohesión familiar, así como la promoción y el entretenimiento personal, sin renunciar a los beneficios profesionales y sociales de la presencialidad.

El tercero, intitulado: Incidencia de los Extremos Térmicos Sobre la Mortalidad Diaria a Diferentes Escalas en España: Análisis Comparado Entre las Áreas Rurales Urbanas, de José Antonio López-Bueno, Julio Díaz, Cristina Linares y Miguel Ángel Navas-Martín; tuvo como objetivo analizar y cuantificar la vulnerabilidad a los extremos térmicos en áreas rurales y urbanas de España. Para ello se realizaron estudios retrospectivos de series temporales y diseño ecológico. Se analizó mediante Modelos Generalizados de Regresión Lineal (GLM) y Modelos Mixtos (MM) la asociación entre la vulnerabilidad hallada y distintos indicadores socioeconómicos como son la ruralidad o índice de privación o pobreza. Los resultados muestran que la evolución temporal de las temperaturas extremas de calor y de frío se corresponde en ambos casos con escenarios de adaptación.

El cuarto, intitulado: Addressing Energy Poverty in the European Union: Analysing Policies, Identifying Challenges, and Mobilizing Local Solutions in Portugal, de João Pedro Gouveia, Salomé Bessa, Katherine Mahoney, Pedro Palma y Miguel Macias Sequeira; en este trabajo se analizó la pobreza energética y sus retos y oportunidades en la Unión Europea, utilizando a Portugal como caso de estudio. Mediante la evaluación de políticas, la propuesta de soluciones eficaces y la defensa de estrategias delimitadas, se presentó la aplicación de políticas, fomentando un futuro energético más inclusivo y sostenible para el sur de Europa.

El quinto, intitulado: *Cosmo-Convivencia Armónica desde la Compresión Andina*, de Pacha Yapucha Yampara Blanco; establece la procedencia de una cultura que respeta la vida, sin embargo, esta comprensión se fue diluyendo y olvidando debido a la seducción de la lógica mercantil capitalista del paradigma de desarrollo y progreso, comprometiendo un bienestar para las generaciones venideras y por lo tanto, se requiere reflexionar sobre sostenibilidad, armonía con el medio ambiente, prácticas que eran parte de la forma de vida de los pueblos ancestrales, por eso es importante no perder de vista el pasado para aprehender y comprender que no solo se vive en la lógica material, sino que se debe llegar a un complemento y armonía con lo espiritual, respetando el espacio-tiempo de cada ser biótico que conforma el pluriverso, para generar un mundo ecológicamente ilustrado y socialmente justo.

El sexto, intitulado: *Categorisation of Land Surface Temperature, Built-up, and Vegetation Behaviour at Neighbourhood Scale: Application of Remote Sensing Methods and Cadastral Data*, de Karina Angélica García Pardo, Samuel Domínguez Amarillo, David Moreno Rangel y José Roberto García Chávez; revela que la contribución de las ciudades a los cambios de temperatura ha provocado el interés por estudiar los factores que influyen en el aumento y descenso de las temperaturas dentro de éstas, donde los elementos edificados y naturales juegan un papel fundamental. Esta investigación presenta un método para identificar puntos cálidos-fríos a escala de barrio, a partir de las Temperaturas de la Superficie Terrestre (TST), y su asociación significativa con las características de edificación y vegetación para dos fechas estacionales analizadas (invierno y verano). Los resultados obtenidos revelan el comportamiento general de cada variable, destacando la importancia de integrar elementos edificados y de vegetación en los estudios de LST. A partir de la identificación y categorización de los puntos calientes y fríos de la LST (más del 45% de la superficie total del barrio), se observó que las alturas de los edificios, la intensidad de edificación, las coberturas vegetales generales y los niveles específicos de vegetación, presentaron valores más significativos (superiores e inferiores a la media) que el resto de variables utilizadas en esta investigación.

El séptimo, intitulado: *Nanotechnology Applications for Sustainable Architecture*, de Eduardo Hernández Silva y Cecilia Bañuelos Barrón; presenta un panorama general de las características técnicas de algunos nanomateriales que se han utilizado eficazmente en aplicaciones arquitectónicas en los últimos años, con importantes beneficios para acelerar la construcción, la gestión sostenible y el alto rendimiento de materiales, sistemas y estructuras. En este contexto, la nanotecnología ha surgido como una disciplina prometedora que ofrece opciones de diseño sostenibles para el medio ambiente y permite a los arquitectos diseñar elementos más flexibles, funcionales y sostenibles. Varios nanomateriales presentan excelentes propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y químicas, por lo que resultan útiles en una amplia gama de aplicaciones arquitectónicas. En este capítulo se describen algunos casos prácticos de nanotecnologías aplicadas a la arquitectura, con el fin de socializar entre los expertos el uso potencial de los nanomateriales en la construcción y acondicionamiento de edificios sostenibles.

En el octavo, intitulado: La Captación de Agua de Lluvia en la Ciudad De México: Una Alternativa para Mejorar el Acceso, de Fabiola S. Sosa-Rodríguez, Jorge Vázquez-Arenas, Arely Rivero Jaimes y Armando Nava Arias; se realizó un Análisis Costo-Beneficio (ACB), utilizando como base la tecnología desarrollada por la UPIITA-IPN. Bajo este contexto, este capítulo aborda las problemáticas del agua en el mundo, en México y en la CDMX en particular. Reflexiona sobre las ventajas y desventajas de los sistemas para la captación de agua de lluvia (SCALL). Finalmente, se analizó el potencial de captación de la CDMX y se evaluaron los costos y beneficios de la tecnología desarrollada para la captación de agua de lluvia, como una estrategia para reducir la inequidad social en el acceso al agua.

En el noveno, intitulado: Situación Actual del Uso de los Sistemas de Aire Acondicionado en los Edificios. Alternativas Bioclimáticas Sostenibles y Resilientes para Mitigar el Cambio Climático, de José Roberto García Chávez; se presenta la situación de afectaciones a nivel global por el incremento de las temperaturas en el planeta, que han aumentado progresiva y rápidamente, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XX, lo que ha provocado un severo Calentamiento Global (CG) en todo el planeta y a su vez un aumento cada vez mayor en el consumo de energía de los sistemas de climatización artificial de los edificios, principalmente para el Aire Acondicionado (AC), exacerbando los efectos del Cambio Climático (CC). Esta situación es evidente en los edificios ubicados en la mayoría de los climas, particularmente durante los períodos de sobrecalentamiento, y no solo durante las condiciones de verano. Una alternativa prometedora para mitigar este problema es la implementación de sistemas bioclimáticos de enfriamiento pasivo en edificios, complementados con programas operativos de eficiencia energética y la implementación de sistemas sostenibles, con base en el uso de energías renovables. Estas alternativas deben tener como objetivo principal proporcionar condiciones de confort ambiental higro-térmico para los ocupantes de los edificios, así como reducir el consumo de energía hacia el logro del objetivo de Edificios de Energía Casi Cero (NZEB) y una efectiva descarbonización. Este trabajo de investigación analizó la situación actual del uso de la energía y su impacto en el medio ambiente y los ecosistemas, así como el uso del AC en los diversos géneros de edificios y plantea diversas alternativas bioclimáticas, sostenibles y resilientes, orientadas a lograr condiciones confortables y saludables para los ocupantes de las edificaciones y así coadyuvar a mitigar el Cambio Climático en el planeta.

En el décimo, intitulado: La Cal como Material para la Construcción de una Sociedad más Comprometida con el Cuidado del Medio Ambiente, de Rosario Tovar Alcázar, expone que la cal es un material de origen natural que a lo largo del tiempo ha sido utilizado tanto en la industria de la transformación, como en la construcción y en múltiples tareas cotidianas y tiene una connotación social con un profundo sentido de identidad, en la que la réplica de técnicas heredadas de generación en generación, es un patrón digno de reconocer y preservar. Este capítulo considera una de las facetas más interesantes de la cal, misma que hace referencia al conocimiento y selección de materiales por parte de la sociedad, para el establecimiento de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático, especialmente en zonas de alta vulnerabilidad geográfica como México.

En el décimo primero, intitulado: Problemas de Drenaje Pluvial en Ciudades con Suelo Kárstico, Caso: Propuestas de Solución para la Ciudad de Mérida, Yucatán, México, de José Antonio Peniche Gallareta y José Rogelio Pérez Monsrreal, se establece la urgente atención que requiere el drenaje pluvial de la ciudad de Mérida para evitar desequilibrios e inundaciones como las que se presentaron en 2020. Las propuestas para mejorar el drenaje pluvial incluyen planeación, estudios previos y conocimiento de las precipitaciones, condiciones del subsuelo y comportamiento de la hidrología superficial y subterránea. El crecimiento urbano disminuye la superficie de infiltración dando lugar a descargas puntuales más intensas que no tienen la capacidad de absorber en el subsuelo, lo que provoca inundaciones.

El décimo segundo, intitulado: Sistemas y Geometrías de Techos para Mitigar la Formación de Islas de Calor Urbano, de Inocente Bojórquez y Yarandy Padilla, establece que el análisis de las interacciones entre las temperaturas superficiales y las condiciones atmosféricas indican los criterios para la planeación urbana con carácter sostenible. Este capítulo consiste en tres etapas para el diseño de techos en edificios de bajo consumo energético como propuesta para la mitigación de la formación de Islas de Calor Urbano, de acuerdo con las recomendaciones emanadas de Acuerdos, Leyes y Normas nacionales e internacionales y se basó en la elección de los meses de mayores variaciones de temperatura, utilizando imágenes satelitales Landsat 8 nivel 1. Los resultados mostraron las posibilidades de diseñar viviendas de bajo consumo energético como una de las alternativas para mitigar la generación de Islas de Calor Urbano.

El décimo tercero, intitulado: Perspectiva Integral para el Desarrollo Sostenible, en Armonía con las Condiciones Climáticas, Sociales y Económicas del Hábitat Tradicional en la Región del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, de Hernán Laguna Rodríguez, se analizó la situación de programas de construcción de viviendas bioclimáticas y se estableció que la construcción moderna actual, así como el uso de materiales, con base en el concreto, hierro y vidrio, entre otros, dominan el mercado, aun cuando no son bioclimáticos, sí son fáciles de adquirir y utilizar, dominando el entorno y supliendo las buenas prácticas bioclimáticas en materia de viviendas en armonía con el medio ambiente.

En resumen, los trece capítulos del presente Libro establecen un importante precedente y paradigma, orientados a la sustentabilidad para coadyuvar a mitigar el Cambio Climático, así como a mejorar la economía, la calidad de vida, el medio ambiente y sobre todo, la salud de las presentes y futuras generaciones de nuestro valioso y frágil hábitat natural, el planeta Tierra.

José Roberto García Chávez

Capítulo 1

Cambio Climático y Salud: Retos de Adaptación al Aumento de Temperaturas en la Arquitectura

**Miguel Ángel Navas Martín, José Antonio López Bueno,
Cristina Linares, Julio Díaz & Teresa Cuervo Vilches**

Unidad de referencia en Cambio Climático, Salud y Medio Ambiente
Urbano. Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), 28029 Madrid, España.

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc),
Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 28033
Madrid, España.

Correo electrónico: manavas@isciii.es

Resumen

Las emisiones globales de gases de efecto invernadero han continuado aumentando, con contribuciones desiguales tanto en el pasado como en la actualidad, debido al uso no sostenible de la energía, cambios en el uso de la tierra, estilos de vida y patrones de consumo y producción insostenibles en diferentes regiones, países e incluso a nivel individual.

Los impactos negativos del cambio climático causado por la actividad humana continuarán aumentando. Entre los diferentes cambios que se están produciendo se encuentra el aumento de las temperaturas extremas. La salud ya está siendo afectada por el aumento de la temperatura global y la destrucción del mundo natural. Las áreas urbanas albergan a una proporción cada vez mayor de la población mundial, lo cual ejerce aún más presión sobre el medio ambiente urbano. Por tanto, los gobiernos locales desempeñan un papel crucial en la mitigación y adaptación al cambio climático.

El objetivo general de este estudio, es resaltar la importancia del cambio climático y su impacto en la salud humana, específicamente en su relación con el calentamiento global. Se realizó una revisión de tres estudios publicados sobre la vulnerabilidad y adaptación al calor en España, centrándonos en aquellos que estaban relacionados con la vivienda. Según la revisión, destacan la rehabilitación, el estado y la edad de la vivienda como factores protectores relacionados con la vulnerabilidad, mientras que la rehabilitación de la vivienda se presenta como una medida de adaptación. La construcción de edificios eficientes y la rehabilitación de viviendas pueden contribuir a reducir los efectos del calor, disminuyendo así su impacto en la salud de quienes residen en ellos. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas de mitigación a los efectos y adaptación al cambio climático en el diseño y mejora arquitectónica de las viviendas.

Palabras clave: Cambio Climático, vulnerabilidad, adaptación, calor, edificios, impacto en salud.

Abstract

Global greenhouse gas emissions have continued to rise, with uneven contributions both in the past and today, due to unsustainable energy use, changes in land use, lifestyles, and patterns of consumption and production in various regions, countries, and even at the individual level.

The negative impacts of climate change caused by human activity will continue to increase. Among the various changes occurring is the rise in extreme temperatures. Health is already being affected by the increase in global temperatures and the destruction of the natural world. Urban areas are hosting an ever-increasing proportion of the world's population, which even adds more pressure on the urban environments. Therefore, local governments play a crucial role in climate change mitigation and adaptation.

The overall goal of this study is to highlight the importance of climate change and its impact on human health, specifically in relation to global warming. We conducted a review of three published studies on vulnerability and adaptation to heat in Spain, with a focus on those related to housing. According to the review, rehabilitation, the condition, and age of the housing emerge as protective factors related to vulnerability, while housing rehabilitation is presented as an adaptive measure. The construction of energy-efficient buildings and housing rehabilitation can help reduce the effects of heat, thereby lessening its impact on the health of those residing in them. Therefore, it is essential to implement climate change mitigation and adaptation measures in the architectural design and improvement of housing.

Keywords: Climate Change, Vulnerability, Adaptation, Heat, Buildings, Health Impact.

Publicación realizada en el marco de la colaboración de “La vivienda iberoamericana ante los desafíos post-COVID y de adaptación al Cambio Global, desde la habitabilidad: propuestas arquitectónicas y técnicas para hábitats igualitarios y salubres (VIbRA-IS)”, del programa LINCGLOBAL 2022, CSIC.

Introducción

El cambio climático no espera: la emergencia climática requiere acciones inmediatas

De acuerdo con el último informe de síntesis del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) correspondiente al Sexto Ciclo de Evaluación, que comenzó en 2015, se destaca que las actividades humanas, principalmente a través de la emisión de gases de efecto invernadero, han sido la principal causa del calentamiento global. Durante el período de 2011-2020, la temperatura global en la superficie ha aumentado en aproximadamente 1,1 °C por encima de los niveles registrados entre 1850 y 1900. Las emisiones globales de gases de efecto invernadero han continuado aumentando, con contribuciones desiguales tanto en el pasado como en la actualidad, debido al uso no sostenible de la energía, cambios en el uso de la tierra, estilos de vida y patrones de consumo y producción en diferentes regiones, países e incluso a nivel individual (IPCC, 2023).

Los impactos negativos del cambio climático causado por la actividad humana continuarán aumentando. Por un lado, los impactos son consecuencia de modificaciones en diversas condiciones climáticas físicas, que se atribuyen cada vez más a la influencia humana. A su vez, dicha influencia se ha asociado a los siguientes cambios observados en las condiciones climáticas físicas (IPCC, 2023):

- Mayor frecuencia de sequías tanto agrícolas como ecológicas.
- Aumento de los incendios de origen meteorológico.
- Aumento de las inundaciones compuestas.
- Incremento de las precipitaciones intensas.
- Retroceso de los glaciares.
- Aumento del nivel del mar a nivel global.
- Acidificación de la capa superficial del océano.
- Aumento de las temperaturas extremas.

Por otro lado, se han observado impactos significativos y generalizados, así como pérdidas y daños atribuidos directamente al cambio climático. Estos impactos abarcan áreas como la disponibilidad de agua y la producción de alimentos, las ciudades, los asentamientos y la infraestructura, la biodiversidad y los ecosistemas, así como la salud y el bienestar. Por lo tanto, el cambio climático tiene un impacto en múltiples aspectos de la vida, especialmente en la salud humana. Entre los efectos relacionados con el cambio climático se encuentran el aumento de las temperaturas extremas, la desnutrición y los incendios forestales. Además, se ha observado un incremento en enfermedades infecciosas, problemas de salud mental y desplazamientos de población como resultado de estos cambios (IPCC, 2023).

El cambio climático es un problema de salud humana

En septiembre de 2021, los editores de revistas de salud de todo el mundo realizaron un llamamiento urgente a tomar medidas para detener la degradación de la naturaleza y proteger la salud. La salud ya está siendo afectada por el aumento de la temperatura global y la destrucción del mundo natural, una situación que ha sido objeto de atención por parte de los profesionales de la salud desde hace décadas (Atwoli *et al.*, 2021). Más recientemente, en el Informe técnico sobre *Cambio climático y salud: Una visión iberoamericana*, se destacan las estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) que indican que el cambio climático producirá un aumento de alrededor de 250.000 muertes adicionales anualmente. Estas muertes se atribuyen a diversas causas, como la desnutrición, la malaria, la diarrea, los eventos climáticos extremos, el aumento de las enfermedades transmitidas por animales (zoonosis) y otros problemas de salud, incluyendo aquellos relacionados con la salud mental. También en el informe se ratifica que el cambio climático se ha convertido en un desafío cada vez

más visible para la salud pública. No solo está generando enfermedades nuevas, sino que también está agravando y expandiendo geográficamente las enfermedades que ya existen (Linares *et al.*, 2022).

Desafíos urbanos frente al cambio climático

Las áreas urbanas albergan a una proporción cada vez mayor de la población mundial. Como resultado, una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero proviene de actividades llevadas a cabo en ciudades y pueblos, donde se experimentan de manera más intensa los efectos adversos del calentamiento global (Puig, 2021).

Se estima que para el año 2030 (Figura 1), aproximadamente tres quintas partes de la población mundial residirá en zonas urbanas, lo cual representa el doble de la cifra registrada en 1950. En la actualidad, las regiones más urbanizadas del mundo son las Américas y Europa (Puig, 2021).

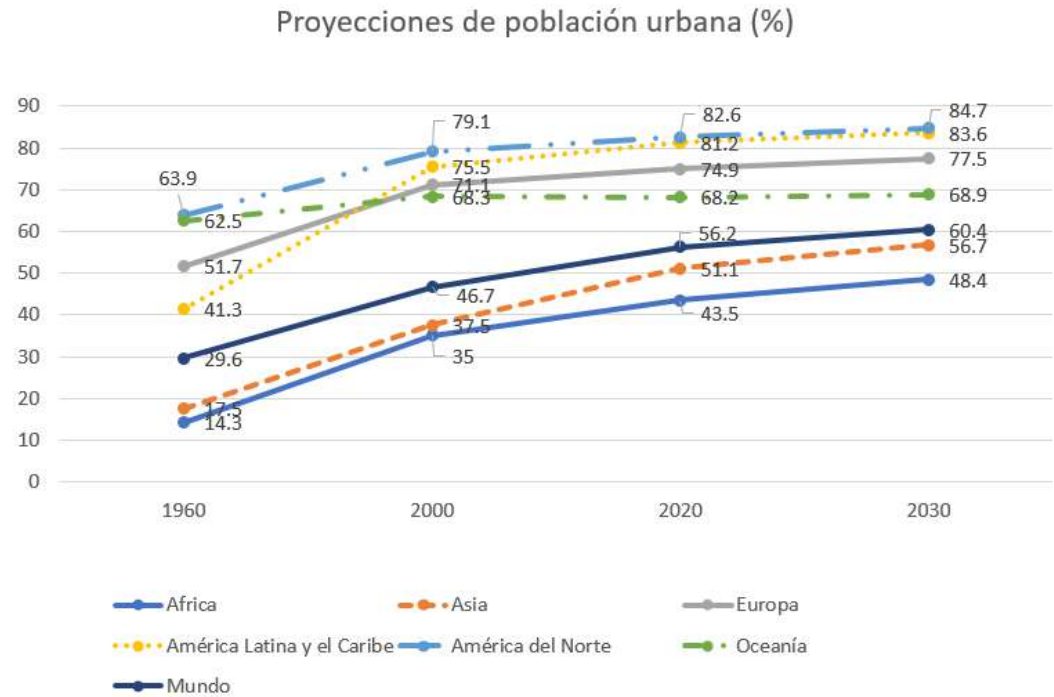


Figura 1. Proyecciones de población de áreas urbanas en el mundo. Elaboración propia.
Fuente: (Puig, 2021).

Por tanto, los gobiernos locales desempeñan un papel crucial en la mitigación y adaptación al cambio climático (Puig, 2021). Según el IPCC la adaptación en los sistemas humanos es “*el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos, a fin de moderar*

los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas” (IPCC, 2022, p. 542). Mientras que la mitigación es la *“intervención humana destinada a reducir las emisiones o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero”* (IPCC, 2022, p. 554).

Vulnerabilidad al calor

Según el IPCC, la vulnerabilidad se define como *“propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación”* (IPCC, 2022, p. 560). En este contexto la vulnerabilidad al calor se refiere a la propensión o predisposición a ser afectado negativamente por condiciones de calor extremo.

La vulnerabilidad de la población frente a altas temperaturas se ve afectada por una variedad de factores. Estos abarcan la pertenencia a grupos especialmente sensibles al calor, como personas de edad avanzada, niños pequeños, mujeres embarazadas, individuos con enfermedades crónicas o condiciones médicas cardiovasculares, respiratorias o neurológicas. Además, es importante considerar factores personales, como los procedentes de situaciones específicas de tratamiento médico, o bien que experimentan trastornos mentales, tienen discapacidades, carecen de autonomía, quienes enfrentan enfermedades agudas o están involucrados en el consumo de sustancias que ponen en riesgo la salud. Aspectos laborales y sociales, como el tipo de empleo o la exposición al aire libre, la situación de vivir en soledad o en situación de calle, y la disponibilidad de viviendas de calidad, también desempeñan un papel crucial. Por último, pero no menos importante, los factores ambientales, como la exposición a la contaminación del aire y residir en áreas densamente urbanizadas (que contribuyen al fenómeno conocido como isla de calor) deben ser consideradas (Navas-Martín, 2022).

Adaptación al calor

Según el IPCC, la adaptación se define como *“el proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos, a fin de moderar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas”* (IPCC, 2022, p. 74). En este contexto, la adaptación al calor se refiere al proceso de adaptación de una población específica al aumento de las temperaturas.

Una manera de conocer si una determinada población está haciendo frente o no al aumento de las temperaturas es observar la relación a lo largo del tiempo entre las temperaturas de mínima mortalidad (TMM) y las temperaturas máximas diarias. Si la TMM cambia a un ritmo más rápido con el paso del tiempo en comparación con la variación de las temperaturas máximas diarias, se puede concluir que la población se ha adaptado. En cambio, si la variación de la TMM es menor en relación con las temperaturas máximas diarias, la población no ha logrado adaptarse (Navas-Martín, 2022).

Desafíos en el ambiente construido al aumento de temperatura

El cambio climático plantea desafíos para el ambiente construido, que históricamente se ha desarrollado bajo la premisa de condiciones climáticas estables. Es probable que los edificios actuales y sus ocupantes se vean enfrentados a condiciones para las cuales no fueron originalmente diseñados. Uno de los problemas más apremiantes en este contexto es el sobrecalentamiento, el cual es una consecuencia del aumento de las temperaturas exteriores y del efecto isla de calor urbano, ambos agravados por el cambio climático. Además, los cambios graduales en las condiciones climáticas o eventos meteorológicos extremos pueden influir de manera considerable en la comodidad térmica en el interior de los edificios. La necesidad de mantener un confort térmico adecuado en los interiores durante el verano se torna cada vez más crucial, y esta preocupación se espera que se intensifique con los efectos del cambio climático (Barbosa, Vicente and Santos, 2016; Stagnum *et al.*, 2020).

Objetivos

El objetivo general de este estudio es resaltar la importancia del cambio climático y su impacto en la salud humana, específicamente en su relación con el calentamiento global. Mientras que los objetivos específicos son destacar los desafíos urbanos que surgen del cambio climático, centrándose en particular en los edificios y las medidas de mitigación y adaptación.

Metodología

Se realizó una revisión de 3 estudios publicados sobre la vulnerabilidad y adaptación al calor en España, centrándonos en aquellos que estaban relacionados con la vivienda. Estos estudios se caracterizan por ser retrospectivos y ecológicos, examinando la relación entre la temperatura y la mortalidad, y considerando variables explicativas relacionadas con la edificación.

Resultados

Con respecto a la vulnerabilidad al calor, de acuerdo con el estudio de López-Bueno *et al.*, (2021) de áreas rurales y urbanas en Madrid, los indicadores de vivienda (licencia de rehabilitación y vivienda en buen estado) demostraron ser factores protectores contra las olas de calor. Según los resultados obtenidos a través de una regresión binomial, se encontró que los indicadores de índice de privación, carácter urbano y porcentaje de habitantes mayores de 64 años fueron todos factores de riesgo esta-

dísticamente significativos. En contraste, los indicadores de vivienda en buen estado y el número de licencias de rehabilitación se mostraron como factores protectores contra las olas de calor.

Asimismo, en un estudio que diferenciaba las zonas urbanas y peri-urbanas de Madrid (López-Bueno et al., 2019), se encontró que la zona centro era la más vulnerable a las olas de calor. Esta mayor vulnerabilidad se explicó en parte por la distribución geográfica de las personas mayores de 65 años —población especialmente vulnerable al calor extremo— y la vivienda antigua. Siendo la zona centro donde ambos indicadores alcanzaban las cotas mayores siendo las diferencias estadísticamente significativas. En el Modelo Lineal Generalizado (GLM), se identificaron diferencias importantes entre las personas mayores de 65 años de la zona norte en comparación con las de la zona sur y central de Madrid. Además, en el caso de la zona central, se observaron diferencias significativas en función de la antigüedad de las viviendas, especialmente en comparación con la zona norte.

En relación a la adaptación, según el estudio ecológico longitudinal realizado en España entre 1983 y 2018 por Navas-Martín et al., (2022), con distinción entre áreas rurales y urbanas, reveló que las poblaciones rurales con mayor número de viviendas rehabilitadas mostraron una mejor capacidad de adaptación al calor. Para medir esta adaptación, el estudio utilizó la variación de la temperatura de mínima mortalidad (TMM) como variable dependiente, y se consideraron diversas variables explicativas, incluyendo datos demográficos, económicos, de vivienda y de salud. Adicionalmente, se controló la variable climatológica de la temperatura umbral de la ola de calor según el percentil 95, y se hicieron distinciones entre provincias urbanas y no urbanas.

En el modelo final, se observó que, en las zonas urbanas, la evolución temporal de la TMM estaba condicionada por la disponibilidad de mayores recursos económicos y la exposición previa a temperaturas elevadas. Por otro lado, en las zonas no urbanas, la calidad de la vivienda y el número de profesionales de la salud desempeñaron un papel crucial. Un mayor número de viviendas rehabilitadas y una mayor proporción de profesionales de la salud en atención primaria se asociaron con una mejor adaptación al calor.

Discusión

Según la revisión de estudios, destacan la rehabilitación, el estado y la edad de la vivienda como factores relacionados con la vulnerabilidad, mientras que la rehabilitación de la vivienda se presenta como una medida de adaptación.

Son varios los estudios que han enfatizado la importancia de las viviendas como factores protectores contra la mortalidad relacionada con el calor extremo. Características como la antigüedad de la vivienda, la falta de aislamiento, el número y geometría de ventanas en relación a la proporción de fachada opaca, y la exposición a la radiación solar son determinantes para su capacidad de mitigación. En España, más del 50% de

las viviendas existentes datan de antes de la década de 1980 y suelen ser antiguas y deficientes en términos de aislamiento. La construcción de edificios eficientes y la renovación de viviendas pueden contribuir a reducir los efectos del calor (Navas-Martín *et al.*, 2022).

La vivienda, por lo tanto, es un elemento de gran relevancia en el contexto del cambio climático. Está relacionada tanto con la mitigación, que busca reducir las emisiones y minimizar el cambio climático, como con la adaptación, que se centra en prepararse para los cambios climáticos que ya están ocurriendo y en proteger tanto a las personas como a las viviendas de sus impactos. Ambas estrategias son esenciales en el proceso de construcción y diseño de viviendas.

Según el informe (TNA) sobre las tecnologías climáticas en un contexto urbano, los edificios se enfrentan a los siguientes desafíos (Puig, 2021):

- Son grandes emisores de gases de efecto invernadero y consumen recursos naturales.
- La construcción de edificios acapara gran parte de los recursos naturales a nivel mundial. Además, la urbanización contribuye a la pérdida de tierras productivas.
- Contribuyen a la contaminación a través de los desechos, en concreto los utilizados para el enfriamiento.
- La urbanización contribuye al aumento de las temperaturas a contrarrestar espacios verdes y por los propios materiales de construcción.
- La calidad del aire interior en muchos edificios es deficiente.
- Los edificios son vulnerables a los efectos del cambio climático, como olas de calor, sequías, incendios e inundaciones.

En consecuencia, las tecnologías esenciales para la mitigación y adaptación son de gran relevancia en el contexto urbano. A nivel de edificios, estos representan la mayor fuente individual de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que implica la necesidad de abordar esta cuestión en las estrategias de mitigación. En cuanto a la adaptación, se recomiendan tecnologías como la refrigeración urbana y la implementación de techos frescos.

En términos generales, las tipologías de mitigación para edificios ofrecen diversas soluciones para abordar el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector de la construcción. Estas estrategias pueden agruparse en cinco categorías principales, cada una con su enfoque particular (Puig, 2021).

Estrategias de diseño pasivo

Las estrategias de diseño pasivo se destacan como una de las formas más eficaces de mitigar el consumo de energía en edificios. Estas estrategias se basan en el uso de elementos naturales, como la luz solar y la ventilación natural, para reducir o

incluso eliminar la necesidad de sistemas de acondicionamiento del aire mediante sistemas mecánicos de climatización y/o calefacción, ventilación e iluminación. Un ejemplo interesante de esto se encuentra en los edificios tradicionales de adobe en Baja California, que aprovechan la combinación del efecto del paso del tiempo con el enfriamiento radiativo nocturno, reduciendo significativamente la demanda energética.

Soluciones basadas en la naturaleza

Por otro lado, es importante considerar las soluciones basadas en la naturaleza como un componente clave en la mitigación del consumo energético de los edificios. Estas soluciones se destacan por imitar la naturaleza y emplear materiales naturales para reducir el impacto ambiental de la construcción. Un ejemplo ilustrativo de soluciones basadas en la naturaleza incluye la implementación de muros y techos verdes en edificios urbanos. Además, la presencia de árboles en las calles urbanas también contribuye a reducir los efectos del calor.

Sistemas de construcción energéticamente eficientes

Los sistemas de construcción energéticamente eficientes desempeñan un papel fundamental en la mitigación. Los edificios consumen una cantidad considerable de energía para la calefacción y la refrigeración. Aquí, se incluyen soluciones como los sistemas de calefacción y climatización eficientes, la adopción de electrodomésticos de bajo consumo y la utilización de tecnología de iluminación LED, lo que contribuye de manera efectiva a la reducción de la demanda energética y, por lo tanto, de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas.

Patrones conductuales de consumo de energía

Los patrones conductuales de consumo de energía también son esenciales en la mitigación, ya que los usuarios tienen la capacidad de influir significativamente en el consumo energético de la vivienda. La apertura de ventanas adecuada, el uso de protección solar y persianas, así como el ajuste óptimo de la temperatura en los sistemas de calefacción o refrigeración, son ejemplos de medidas que los ocupantes pueden tomar para reducir su huella energética.

Generación de electricidad *in situ* a partir de energías renovables

Por último, la generación de electricidad *in situ* a partir de energías renovables está ganando cada vez más importancia en la mitigación de las emisiones de carbono. La adopción de fuentes alternativas de electricidad y calor, como la instalación de pane-

les solares fotovoltaicos en los techos de los edificios, es un ejemplo relevante. Esto no solo reduce la dependencia de fuentes de energía convencionales, sino que también contribuye a la generación de electricidad más limpia y sostenible.

En resumen, estas tipologías de mitigación ofrecen enfoques complementarios y efectivos para reducir el impacto ambiental de los edificios urbanos. Al considerar una combinación de estrategias de diseño pasivo, soluciones basadas en la naturaleza, eficiencia energética, cambios en los patrones de consumo y la adopción de energías renovables, es posible avanzar hacia un entorno construido más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Por todo ello, es esencial encontrar un equilibrio entre las estrategias de mitigación y adaptación al seleccionar diseños para nuevos edificios y al modernizar estructuras antiguas. La adaptación se convierte en un aspecto crucial en este contexto, y la evaluación de las medidas de adaptación en la construcción se convierte en una prioridad. Teniendo en cuenta, los efectos del cambio climático tienen un impacto directo en la salud pública. Un diseño mejorado de edificios y la implementación de estrategias pasivas pueden significativamente reducir el riesgo de sobrecalentamiento. Esto subraya aún más la importancia de considerar tanto la mitigación como la adaptación en el diseño y la renovación de edificios en el contexto de cambio climático (Stagrum *et al.*, 2020).

Conclusiones

La construcción de edificios eficientes y la rehabilitación de viviendas pueden contribuir a reducir los efectos del calor, disminuyendo así su impacto en la salud de quienes residen en ellos. Por lo tanto, es fundamental implementar medidas de mitigación a los efectos y adaptación al cambio climático.

Referencias

- Atwoli, L. *et al.* (2021) 'Llamamiento a la acción urgente para limitar el aumento de la temperatura global, restaurar la biodiversidad y proteger la salud', *Gaceta Sanitaria*, 35(6), pp. 512–514. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.GACETA.2021.08.001>.
- Barbosa, R., Vicente, R. and Santos, R. (2016) 'Comfort and buildings: climate change vulnerability and strategies', *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 8(5), pp. 670–688. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJCCSM-05-2015-0058>.
- IPCC (2022) 'Annex I: Glossary', in *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press, pp. 541–562. Available at: <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.
- IPCC (2023) *AR6 Synthesis Report*, Diriba Korecha Dadi. Panmao Zhai.

- Linares, C. et al. (2022) *SESPAS publica el informe técnico «Cambio climático y salud: una visión iberoamericana»* – Sespas. Available at: <https://sespas.es/2022/12/27/sespas-publica-el-informe-tecnico-cambio-climatico-y-salud-una-vision-iberoamericana/> (Accessed: 3 July 2023).
- López-Bueno, J.A. et al. (2021) 'Analysis of the impact of heat waves on daily mortality in urban and rural areas in Madrid', *Environmental Research*, 195, p. 110892. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110892>.
- López-Bueno, J.A., Díaz, J. and Linares, C. (2019) 'Differences in the impact of heat waves according to urban and peri-urban factors in Madrid', *International Journal of Biometeorology*, 63(3), pp. 371–380. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01670-9>.
- Navas-Martín, M. et al. (2022) 'Effects of local factors on adaptation to heat in Spain (1983–2018)', *Environmental Research*, p. 112784. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.112784>.
- Navas-Martín, M.Á. (2022) 'Desentrañando los efectos del calor en la salud humana en contextos desigualitarios', in S. Fernández Herrero (ed.) *Desigualdades climáticas: impactos y responsabilidades de los eventos meteorológicos extremos*. FUHEM Ecos. Madrid, pp. 19–29.
- Puig, D. (2021) *Climate technologies in an urban context*. Copenhagen. Available at: www.tech-action.org (Accessed: 9 May 2023).
- Stagrum, A.E. et al. (2020) 'Climate Change Adaptation Measures for Buildings—A Scoping Review', *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 1721, 12(5), p. 1721. Available at: <https://doi.org/10.3390/SU12051721>.

Capítulo 2

El Teletrabajo, Tarea Doméstica: Alcances Ambientales, Sociales y Económicos en Entornos Urbanos

**Teresa Cuervo-Vilches, Miguel Ángel Navas-Martín,
Maribel Jaimes y Mónica Aguilera**

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc),
CSIC.

Correo electrónico: teresacuervo@ietcc.csic.es

Resumen

El teletrabajo, *home office* o trabajo en remoto, es una modalidad laboral con desigual respuesta a nivel global, si bien en la mayoría de los países desarrollados se ha mostrado minoritariamente frente a la presencialidad. Sin embargo, la irrupción de la pandemia por COVID-19 y las consecuentes medidas de precaución aplicadas a nivel mundial (confinamientos principalmente) revolucionaron la vida en los hogares, incluyendo el ámbito profesional. Trabajar desde casa se ha convertido en una tendencia creciente en la era pospandemia. Sin embargo, esta situación generaba un interrogante ¿Están nuestros hogares preparados para el teletrabajo? Desde la reflexión conjunta generada por diferentes experiencias desarrolladas por los autores de esta contribución, se ha tratado de plasmar un análisis holístico, sobre la sostenibilidad y resiliencia en entornos urbanos, que puede conllevar el teletrabajo en el hogar. Más concretamente, se analizó la implicación de las condiciones ambientales interiores de los espacios de trabajo, y su repercusión sobre la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades, tanto en España como en México, durante sendos confinamientos por COVID-19 a lo largo de 2020. Para enriquecer aún más las reflexiones sobre esta modalidad laboral y su aplicación práctica en las viviendas, se hizo uso de las fotografías sobre el espacio de teletrabajo o telestudio que se recolectaron en sendos estudios, en tales circunstancias. Los resultados arrojan la necesidad de analizar las implicaciones a nivel local y en condiciones normales, teniendo en cuenta distintas contingencias y cuestiones estructurales, mediante indicadores que impactan en la sostenibilidad, mostrando grandes diferencias entre las realidades urbanas globales. Sin embargo, estos análisis resultan relevantes para adoptar esta modalidad de trabajo al menos en forma híbrida o mixta, favoreciendo en todo caso al medio ambiente y la posible conciliación y familiar, así como la promoción y el ocio personal, sin renunciar a los beneficios profesionales y sociales de la presencialidad.

Palabras clave: teletrabajo, sostenibilidad, conciliación, hogar, espacio.

Abstract

Teleworking, home office or remote work, is a work modality with uneven response at a global level, although in most developed countries it has been a minority compared to in-person work. However, the emergence of the COVID-19 pandemic and the consequent precautionary measures applied worldwide (mainly lockdowns) revolutionized life at home, including the professional sphere. Working from home has become a growing trend in the post-pandemic era. However, this situation raised a question: Are our homes ready for teleworking? From the joint reflection generated by different experiences developed by the authors of this contribution, an attempt has been made to capture a holistic analysis of the sustainability and resilience in urban environments, which teleworking at home can entail. More specifically, the implication of the indoor environmental conditions of work spaces was analyzed, and its impact on the sustainability and resilience of cities, both in Spain and Mexico, during two COVID-19 confinements throughout 2020. To further enrich the reflections on this work modality and its practical application in homes, use is made of photographs of the teleworking or telestudy space that were collected in separate studies, in such circumstances. The results show the need to analyze the implications at the local level and in normal circumstances, taking into account different contingencies and structural issues, through indicators that impact sustainability, showing great differences between global urban realities. However, these analyzes are relevant to adopt this type of work, at least in hybrid or mixed form, favoring in any case the environment and possible conciliation and family life, as well as promotion and personal leisure, without giving up professional benefits and social aspects of presence.

Keywords: Telework, sustainability, conciliation, household, space.

Introducción

Aunque el teletrabajo en el contexto del COVID-19 es un tema novedoso, la adopción del teletrabajo como forma de empleo y todo lo que ello conlleva e implica, ha sido objeto de estudio durante décadas. Uno de los aspectos investigados recurrentes es la razón por la cual las empresas y los empleados han sido más bien reacios a adoptar el teletrabajo, considerando los beneficios reales a diferentes niveles y las incertidumbres o preocupaciones que pudieran surgir de su implementación. Por ello, han surgido diferentes puntos de vista a la luz de las experiencias reales frente a otras más teóricas.

En España, durante 2019, la proporción de personas que teletrabajaban habitualmente era del 4,8%. Durante el confinamiento, en la primavera de 2020, este porcentaje aumentó al 9,9%, con un cambio sustancial en la forma de desarrollar el teletrabajo. Después del confinamiento, en el primer trimestre de 2021, se situó en el 11,2% (Instituto Nacional de Estadística, 2021). Por tanto, ha sido como resultado de la pandemia cuando esta forma de trabajar ha irrumpido notablemente en el panorama nacional, ya que tradicionalmente estaba muy limitado (Cuerdo-Vilches *et al.*, 2021a, 2021b).

A nivel nacional, en España se estableció un marco legal tras declararse el confinamiento por el SARS-CoV-2, para regular las condiciones laborales de las personas que desempeñaban su trabajo de forma remota. Entre las principales medidas, además de la provisión de los medios necesarios y su carácter voluntario, se añadieron algunos incentivos para favorecer el teletrabajo en áreas rurales, como medida para revertir la despoblación de territorios principalmente no urbanos (Gobierno de España, 2020a). Asimismo, en el segundo semestre de 2020, se reguló el teletrabajo en las Administraciones Públicas, de modo que esta forma de trabajar estuviera organizada y estructurada correctamente, garantizando el funcionamiento y servicio a los intereses generales (Gobierno de España, 2020b).

Aspectos medioambientales asociados al trabajo remoto

La conexión del teletrabajo con los tres aspectos principales de la sostenibilidad ha sido un tema constante de debate. Ambientalmente, se argumenta que el teletrabajo reduce el consumo de energía fósil, la contaminación del aire y las emisiones relacionadas debido a la disminución de la movilidad de los teletrabajadores (de Abreu e Silva y Melo, 2018; Giovanis, 2018; Guerin, 2021; Zhang *et al.*, 2020).

Sin embargo, este argumento no es tan obvio. En primer lugar, los beneficios pueden no ser tan significativos al considerar todas las formas de movilidad laboral (Aguilera *et al.*, 2016). En segundo lugar, aunque los teletrabajadores pueden reducir el número total de viajes al eliminar los desplazamientos relacionados con el trabajo, los viajes restantes tienden a ser más largos. Algunos autores incluso sugieren un aumento en la movilidad no relacionada con el trabajo, aunque la causalidad detrás de la elección de la ubicación del hogar y el teletrabajo sigue siendo incierta. Una tendencia notable es que aquellos que optan por lugares más remotos tienden a teletrabajar (de Abreu e Silva y Melo, 2018; Moeckel *et al.*, 2020).

En cuanto al aspecto económico relacionado con la productividad y los beneficios asociados con la producción de las empresas y el desempeño de los empleados, se presentan varios desafíos. Las perspectivas de la empresa o el empleador a menudo involucran resistencia, derivada de los necesarios cambios organizativos internos (Rietveld, 2011), la implementación de herramientas de seguridad de la información en el teletrabajo (Silva-C *et al.*, 2019) e inversiones tecnológicas (Aguilera *et al.*, 2016). Además, surgen incertidumbres con respecto al control del trabajo de los empleados, que pasaría a basarse en objetivos o resultados (Groen *et al.*, 2018).

También existen dudas sobre la mayor efectividad de los teletrabajadores. Algunos estudios sugieren que esto depende en parte de las horas dedicadas al teletrabajo y está vinculado a la eficiencia derivada de evitar los desplazamientos, especialmente los más largos (Kazekami, 2020). Sin embargo, en procesos creativos, la productividad no parece disminuir en el trabajo en equipo cuando se mantiene un contacto mínimo en persona para facilitar el intercambio de conocimientos (Coenen y Kok, 2014).

Tendencias sociodemográficas en la implementación del teletrabajo

El aspecto social no está exento de debates. En primer lugar, ni siquiera en la literatura hay unanimidad sobre los beneficios informados o esperados de la conciliación entre el trabajo y la vida. Algunos autores señalan matices relacionados con la composición del hogar y las etapas vitales de las personas, destacando la necesidad de conciliar no solo con el cuidado, sino también con la redistribución necesaria de las tareas domésticas dentro del hogar (Silva-C *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Además, el teletrabajo está vinculado a ciertos perfiles de empleados (Aguilera *et al.*, 2016), que tienden a ser personas con mayores ingresos, trabajadores por cuenta propia, con estudios universitarios y de género masculino, siendo más propensos al teletrabajo (de Abreu e Silva y Melo, 2018). Finalmente, otras resistencias provienen de aspectos conductuales, culturales e incluso políticos, tanto para empleadores como empleados, así como la necesidad de que los actores faciliten la transición al nuevo modelo de trabajo, frente a la arraigada forma tradicional y la movilidad, la falta de políticas y legitimidad (Hynes, 2016). Esto, en definitiva, implicaría cambios en los estilos de vida y patrones de actividad de los trabajadores (Rietveld, 2011).

Durante el confinamiento por COVID-19, el teletrabajo contribuyó no solo a la seguridad de las personas, sino también a una disminución drástica de la presión ambiental al reducir la movilidad (Moeckel, 2017). Sin embargo, el posible beneficio en el hogar y la percepción del equilibrio entre el cuidado del hogar y la actividad laboral no fue tan claro (Zhang *et al.*, 2020).

Existen además, durante el confinamiento por COVID-19, ciertos factores sociodemográficos, como el género, directamente vinculados a la modalidad de teletrabajo, puesto que las mujeres tenían más probabilidades de adoptar esta modalidad (Sostero *et al.*, 2020). En efecto, muchas mujeres valoraron quedarse en casa para conciliar la vida familiar y laboral (Hamadani *et al.*, 2020), máxime en el periodo relacionado con el confinamiento por COVID-19. Comparativamente, las mujeres estuvieron más en casa (Oliver *et al.*, 2020), ya sea debido a una mayor presión y a la incertidumbre laboral, como el cuidado de menores y otros dependientes, o debido a convenciones sociales, según informa la ONU (United Nations, 2020). Esto generó potencialmente cierta frustración debido a la productividad y la satisfacción percibida en el aspecto profesional (Feng y Savani, 2020).

En cuanto a las redes de apoyo, durante la pandemia ha habido numerosas iniciativas de servicios en comunidades locales y barrios españoles. Algunas de ellas se llevaron a cabo a nivel de política municipal (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, 2020). Otras iniciativas fueron llevadas a cabo por asociaciones de vecinos (AAVV Madrid, 2021). Se desarrollaron diferentes acciones de apoyo, incluyendo ayuda con las compras y apoyo psicológico (RAMUCA, 2020).

Según la guía de buenas prácticas para el contexto del teletrabajo durante la pandemia, se recomendó crear redes sociales que permitan el apoyo al tele-estudio en el entorno del vecindario, con la ayuda de personas de confianza para atender cuestio-

nes escolares para los jóvenes. Se promovió el apoyo en el cuidado, por ejemplo, mediante turnos de cuidado, para facilitar el teletrabajo sin interrupciones, así como generar espacios comunitarios y cuidado comunitario. Además, se propusieron “bancos de tiempo” para impulsar el intercambio de tiempo para realizar diferentes tareas domésticas (Red de Unidades de Igualdad de Género para la Excelencia Universitaria, 2021).

Barreras laborales a la implementación del teletrabajo

Una actitud ampliamente extendida antes de la pandemia por parte de directivos y empleadores consistía en rechazar el teletrabajo. Algunas de las razones se basaban en la preferencia por seguir modelos de trabajo tradicionales (Hynes, 2016), así como la necesidad de implementación y mejora de los procesos y sistemas de información necesarios para hacer operativo el teletrabajo dentro de las empresas (de Abreu e Silva y Melo, 2018). Algunos estudios se refieren a las tales diferencias en la implementación del teletrabajo distinguiendo entre pequeña y mediana empresa, y grandes compañías (Bajzikova et al., 2016). En relación a lo anterior, la transformación digital resultaría imprescindible en los hogares susceptibles al teletrabajo (Kodama, 2020). Sin embargo, esto conduciría a la consiguiente pregunta de si nos enfrentamos a una nueva brecha digital (Sostero et al., 2020).

Sin lugar a dudas, hay una tendencia en la capacidad laboral para asumir el teletrabajo. Ciertas áreas y sectores profesionales respaldaban mejor la modalidad de trabajo remoto que otros. No obstante, el teletrabajo, aunque se implementa fácilmente, todavía era rechazado en algunos sectores, como la Administración Pública y otras actividades. De lo contrario, ha sido más común entre los autónomos, las personas más cualificadas y las pequeñas empresas (Anghel et al., 2020).

Teletrabajar en tiempos de COVID-19

El teletrabajo ha sido una modalidad laboral minoritaria, especialmente en España, de adopción reciente debido a la pandemia. Este hecho ha condicionado cómo los hogares han asumido esta forma de trabajar. Con el brote de la pandemia de COVID-19, se estableció el confinamiento como medida preventiva y de contención para la salud pública a nivel mundial, y más específicamente en países europeos como España (Cuerdo-Vilches et al., 2020b). El impacto psicológico del confinamiento y el distanciamiento social ha afectado de manera desproporcionada a la población (Brooks et al., 2020), golpeando de manera más significativa a los más desfavorecidos (Cuerdo-Vilches et al., 2020a; Navas-Martín y Cuerdo-Vilches, 2023). Como consecuencia, esto generó un agravamiento de la desigual distribución de la riqueza (Palomino et al., 2020).

La actividad laboral ha sufrido de manera muy diferente dependiendo del sector, las características sociodemográficas, la calificación y la zona geográfica o el nivel de restricción impuesto, entre otros factores (Abellán García et al., 2021). Una de las consecuencias a nivel mundial ha sido el fomento del teletrabajo (Belzunegui-Eraso y Erro-Garcés, 2020). Esto no solo supuso una creciente modalidad de trabajo, sino también una medida preventiva contra la propagación del coronavirus para la población activa y su entorno (Biasi, 2020). Esta situación de aislamiento domiciliario supuso un cambio disruptivo, por la llegada abrupta de lo que hasta entonces había sido una actividad doméstica puntual, o eventual, en la mayoría de los países, y en cualquier caso para minorías con trabajos cuyas características lo permitieran, y desigualmente instaurada en los países desarrollados.

Por tanto, hasta entonces no habría surgido el gran interrogante que atañe al espacio o área donde este se realizaría: ¿estaban las viviendas preparadas? ¿Cómo responderían las residencias españolas al hecho de trabajar desde casa? (Cuerdo-Vilches, 2020a).

Casos de estudio: teletrabajo y pandemia COVID-19. Casos español y mexicano

La limitación transversal más destacada en todos los debates de la literatura es precisamente la naturaleza teórica de muchos de estos estudios, donde se aplicaban diferentes métodos, destacando modelos teóricos, para prever posibles escenarios y sus implicaciones, aunque también se hayan estudiado datos y encuestas primarios.

La literatura mencionada muestra aspectos interesantes sobre el teletrabajo, que afectan directamente a la comprensión de esta modalidad laboral incipiente, así como su implementación desigual según una multitud de factores a tener en cuenta, internos y externos al entorno doméstico. Sin embargo, hasta donde el conocimiento alcanza, son prácticamente nulos los estudios publicados que analizan en detalle los aspectos del espacio de trabajo en el hogar desde el punto de vista de la vivienda y la calidad espacial general, teniendo en cuenta a su vez diferentes aspectos que intervienen en su percepción, como pueden ser aspectos ambientales, espaciales, ergonómicos, funcionales o de recursos que afectan la evaluación final y la calidad del mismo.

Desde el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), se lanzó el estudio [COVID-HAB], sobre confinamiento por COVID-19, vivienda y habitabilidad (COVID-HAB, s/f), en colaboración con el Instituto de Salud Carlos III (ISCIII), que planteaba una metodología de tipo mixta, y participativa, para analizar el papel que adquirió la vivienda durante el periodo de confinamiento decretado por el Gobierno Español el 14 de marzo de 2020, y que se extendería hasta el 21 de junio del mismo año (Gobierno de España, 2020c). Esta metodología se basaba en el uso de dos enfoques, uno cuantitativo y otro cualitativo, para conocer con mayor grado de detalle, y para apreciar con mayor grado de matices, las experiencias que estaban viviendo los hogares teletrabajadores españoles.

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio era analizar en profundidad la naturaleza de estos espacios de teletrabajo en los hogares y su adecuación, considerando múltiples factores, en el contexto del confinamiento. Esto significa que, a diferencia de las circunstancias normales, también se consideraron otras variables como la presencia de menores en el hogar o el compartir el espacio de teletrabajo.

Este estudio reveló importantes hallazgos de lo que supuso teletrabajar de forma inusitadamente masiva en España, al no haber existido antecedentes en semejante cantidad de población ocupada.

Dado que este fenómeno se considera sin precedentes a nivel mundial en términos de teletrabajo continuo en casa, impuesto por instituciones de salud y gubernamentales, y con el resto del hogar presente las 24 horas del día, el fenómeno se abordó desde una perspectiva mixta, permitiéndonos recopilar datos relevantes por número de respuestas, así como otras perspectivas desde un punto de vista cualitativo. Esto se hizo utilizando fotografías, respaldadas por una narrativa contextual de los participantes.

Posteriormente, este estudio fue replicado en México, previa adaptación a la realidad nacional, para conocer las condiciones habitacionales y ambientales de las viviendas allí, y la capacidad resiliente de los hogares y espacios domésticos ante tal contingencia. Para ello se volvió a aplicar un enfoque mixto participativo, mayoritariamente cubierto por población universitaria, debido a que el estudio fue desarrollado por las universidades Nacional Autónoma de México (UNAM) y La Salle.

Objetivos

El objetivo principal de esta contribución es analizar el teletrabajo como actividad doméstica, y sus implicaciones tanto habitacionales y ambientales a nivel residencial, como aquellas que, a nivel más general, afectan los ámbitos social, económico y medioambiental, partiendo de dos estudios de caso durante el confinamiento por COVID-19: el caso español y el caso mexicano.

Descripción de la metodología

Para elaborar esta investigación científica, se tuvieron en cuenta los resultados de diferentes investigaciones llevadas a cabo por los autores de este capítulo, en colaboración con otras entidades y grupos de investigación. Por un lado, se incluyen reflexiones sobre el teletrabajo en España durante la pandemia por COVID-19 futuro del proyecto [COVID-HAB], sobre confinamiento por COVID-19, vivienda y habitabilidad, desarrollado conjuntamente por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc, CSIC), y el Instituto de Salud Carlos III, ambos españoles.

Los enfoques cuantitativos y cualitativos aplicados permitieron clasificar este espacio de teletrabajo y su grado de adaptación con respecto a sus usuarios. Un cuestionario también abordó aspectos generales sobre la adaptación de los hogares y las viviendas a las necesidades del confinamiento por COVID-19. Estos aspectos se complementaron con la solicitud de una fotografía del espacio de trabajo, tres etiquetas para caracterizarlo y preguntas contextuales sobre lo que se fotografió, la intención de tomar la foto y la posible contribución social a través de reflexiones abiertas. Este análisis cualitativo partió de una adaptación metodológica de una técnica llamada Fotovoz (Copes et al., 2018; Dodds y Hess, 2020; Samsuni et al., 2019; Sánchez-Ledesma et al., 2020), que intenta mostrar la realidad a través de gráficos y testimonios, de manera más detallada y abierta a descubrimientos. Esto también hizo posible adaptarlo al formato en línea para llegar a la mayor cantidad posible de personas confinadas. Estas aproximaciones a la calidad de los espacios de teletrabajo se evaluaron teniendo en cuenta tanto las características de los hogares como las de las viviendas, para todo el territorio nacional.

Además, fruto de la réplica de este estudio en México por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y La Salle-México surgen interesantes sinergias con el equipo de investigación de CSIC e ISCIII, cuya propuesta es financiada en la convocatoria Retos COVID de la Universidad de La Salle-México.

Además, enriquecen esta contribución otras experiencias, como la participación en iniciativas europeas, nacionales y nuevos proyectos en marcha, como el proyecto CHAmbER, financiado por el gobierno español en la convocatoria sobre Generación del Conocimiento 2022, con referencia PID2022-142864NA-I00, sobre Condiciones Habitacionales y Ambientales de los Espacios de Teletrabajo en los Hogares Españoles, ya contextualizadas en circunstancias habituales, y no bajo contingencia COVID-19.

Ámbito de estudio

El alcance de los contenidos expuestos en este capítulo se refieren a los casos de estudio español y mexicano, aunque se incluyen además referencias internacionales a fin de complementar y referenciar datos relativos a estas y otras realidades.

Resultados

Principales hallazgos de la muestra española

En primer lugar, de la muestra obtenida, un 67% de los hogares declara tener como mínimo una persona teletrabajando o teleestudiando. Entonces, ¿dónde teletrabajaban y teleestudiaban los miembros de los hogares españoles?, ¿estaban equipados con todo lo necesario? ¿cómo les estaba resultando la experiencia?

Estas preguntas deben responderse teniendo en cuenta la situación extrema del confinamiento de todo el hogar.

Según los resultados arrojados por el estudio, un 57,6% de los hogares destinó un espacio fijo para trabajar, bien exclusivo (38,6%), bien multiusos (19%). Sin embargo, un 34,45% ocupó un espacio circunstancialmente, y un 8% no tenía un lugar fijo (Figura 1).



Figura 1. Dos imágenes del caso español que muestra diferentes espacios de trabajo.

Fuente: elaboración propia.

El espacio de teletrabajo se consideró, de forma general, “adecuado”, por los hogares participantes. Los aspectos valorados como más adecuados de estos espacios fueron: la entrada de luz natural (79,4%), el tamaño del espacio (73,9%), o sus características térmicas (69,6%). Le siguieron el mobiliario, el acabado de las superficies, y las vistas (alrededor de un 50%).

En general, los encuestados aprovecharon la luz natural, aumentaron la frecuencia de ventilación, y consideraron buena la calidad del aire interior.

Sin embargo, las viviendas no alcanzaron los estándares de confort subjetivo en aislamiento al ruido. Su valor promedio se situó entre “poco aisladas” y “adecuadamente aisladas”. Muchos testimonios declararon percibir más ruido durante el confinamiento. Esto dificultaba el desempeño del trabajo, impidiendo la concentración.

En términos de confort térmico, hay que resaltar en primer lugar que el confinamiento transcurrió casi totalmente en primavera, con temperaturas moderadas. Esto tuvo como consecuencia una contención en el consumo energético destinado a tal fin. Pero, ¿qué habría ocurrido de haberse dado en pleno invierno?, ¿y si se hubieran tenido que prolongar las medidas de confinamiento por rebrote, durante verano? Las medidas disponibles para alcanzar el confort térmico en las viviendas participantes, consistían en calefacción individual en un 73,6%. De estas, un 41% eran eléctricas, bien con bombas de calor o por efecto Joule. Así, un 4% de las viviendas no disponía de aire acondicionado (refrigeración). Otras utilizaban bombas de calor (24%) o equipos de refrigeración (14%).

En cuanto a la conexión a internet, y los recursos digitales con los que contaban, no sorprendió que entre los equipos domésticos que más incrementaron su uso durante el confinamiento, destacaran los ordenadores (89,6%), y los dispositivos móviles

(84,6%). Según el estudio, los medios digitales de teletrabajo en casa se consideraron en gran medida suficientes o buenos. Con respecto a la conexión a la red, un 85,5% de los hogares tenía contratado internet en casa. Un 10,5% usaba indistintamente la conexión doméstica o móvil. Un 3% usó exclusivamente la conexión móvil.

Con respecto a la ergonomía y el espacio de teletrabajo, la mayoría de los hogares españoles reveló, sin embargo, ambientes inadecuados para teletrabajar. Mesas y sillas típicas de salón o comedor; improvisadas mesas auxiliares con alturas inadecuadas; o el uso mayoritario de equipos portátiles, configuraron de forma habitual el mobiliario de estos espacios laborales.

Sin embargo, esta tendencia se correspondía poco con la aparente satisfacción y adecuación de las condiciones de teletrabajo observadas y vividas por los hogares participantes. ¿A qué se debía esto? Algunas de las razones eran: la localización laboral en espacios compartidos, junto a otros miembros del núcleo familiar, o la necesidad de aislarse de ellos; en la búsqueda de una conexión de internet más estable (por cable, mejor que por wifi); y con el objetivo añadido de conciliar vida privada y profesional.

En relación con la conciliación familiar, este estudio mostró interesantes hallazgos, pues en la percepción de dedicación temporal a tareas diarias durante el confinamiento, destacó especialmente el teletrabajo, y tras él las tareas domésticas, y el descanso. Sorprende, sin embargo, que el tiempo empleado en cuidado de hijos o personas dependientes no fuera especialmente destacado, pese a ser una realidad en muchos hogares. ¿Puede que revelara el sentimiento de que “estábamos sin estar”?

Cabe destacar, que la presencia en general de todo el núcleo familiar en el hogar, llevó a un incremento en el consumo energético, donde tanto los electrodomésticos de la cocina como los dispositivos electrónicos fueron los aparatos que aumentaron significativamente su uso. Esto también se debió al teletrabajo, lo cual da una pista de otro tipo de consecuencias no tan positivas para quienes trabajan así.

Finalmente, sobre la deslocalización que supone el teletrabajar, se puede concluir que esta modalidad laboral permite fijar la residencia en otros entornos lejanos a la ciudad, a fin de localizar viviendas más confortables, exteriores, sin contaminación ni ruido, y más baratas. Sin embargo, parece no quedar claro si las implicaciones ambientales serían positivas o no, puesto que desaparecerían los desplazamientos laborales, pero podrían darse en mayor número y distancia, otros destinados a otras causas, como por ocio, socialización o abastecimiento, al aumentar el tiempo libre.

Resultados más destacados de la muestra mexicana

En este caso (Jaimes Torres *et al.*, 2021), la muestra más proactiva fue de edad más temprana, puesto que el estudio se promovió en el ámbito académico universitario. Pese a darse más participación en el ámbito urbano, mayoritariamente se trataba de viviendas unifamiliares, frente a una minoría de apartamentos con una amplia disponibilidad de espacios abiertos al exterior.

En cuanto a la percepción de las condiciones ambientales interiores, tanto la iluminación como la calidad ambiental interior se declaraban buenas o apropiadas (Figura 2). Sin embargo, en cuanto al aislamiento al ruido, sí encontraron en casi la totalidad de las viviendas un aislamiento deficiente (48,2%) o muy ajustada (41,2), frente a aquellos que declararon estar adecuadamente aislados, en torno a un 10%.



Figura 2. Dos imágenes del caso mexicano que muestran una adecuada iluminación natural en el espacio de trabajo.

Fuente: elaboración propia.

Sobre la disponibilidad de sistemas activos de climatización frío-calor en la vivienda, se encontraron en un 77% sistemas de calefacción, aunque la mayoría no usó ninguno de estos nunca o sólo cuando fue estrictamente necesario. En el caso del aire acondicionado, más de tres cuartas partes no disponía del mismo. Menos de la mitad de las viviendas declaró encontrarse confortable con la temperatura interior del hogar.

En lo referente al uso de dispositivos tecnológicos, también en este sentido se destacó el uso creciente de dispositivos con acceso a internet, y de tipo tecnológico, lo cual ahonda, al igual que el caso español, en el incremento de consumo energético de esta modalidad.

En cuanto a la declaración sobre dedicación del tiempo, los resultados fueron análogos al caso español, donde el teletrabajo/telestudio encontró una dedicación mayoritaria, mientras que los hogares, pese a tener presencia de menores y/o dependientes, no eran conscientes del tiempo dedicado a su vigilancia o cuidado.

Discusión

Este estudio ha explorado la evaluación de la capacidad de adaptación (resiliencia) de las viviendas, considerando las diversas tareas realizadas para mejorar la calidad de vida de las personas, así como sus potenciales implicaciones y la sostenibilidad de esta modalidad laboral. Se han examinado aspectos como la distribución y adapta-

ción del espacio, patrones y cambios en el comportamiento, hábitos de ventilación e iluminación, calidad ambiental interior, disponibilidad y frecuencia de uso de suministros, instalaciones y dispositivos térmicos, así como la comodidad percibida. La resiliencia se ha abordado desde diversas perspectivas y es un concepto en constante evolución. En el contexto de los hogares, está vinculada a factores como los ingresos y activos del hogar, específicamente referidos como “la capacidad de los hogares para enfrentar las necesidades básicas de sustento en situaciones de emergencia o crisis” (Ur Rahman *et al.*, 2021). En términos más detallados, la resiliencia en las viviendas debe abarcar cuatro aspectos esenciales desde la perspectiva de los residentes a lo largo de su ciclo de vida útil: habitabilidad, sostenibilidad, accesibilidad y flexibilidad (Cubillos, 2017).

Las limitaciones de este estudio se basan en su propia naturaleza, que define a los estudios de caso. Si bien además estos se contextualizan en una experiencia poco habitual, en un “experimento” social, podría decirse, han dado clara cuenta del estado en el que se encontraban las casas para afrontar una tarea que se postula como incipientemente doméstica. El Proyecto Nacional CHAMBER, financiado por el gobierno español en la convocatoria sobre Generación del Conocimiento 2022, con referencia PID2022-142864NA-I00, sobre Condiciones Habitacionales y Ambientales de los Espacios de Teletrabajo en los Hogares Españoles, busca caracterizar las viviendas (en este caso la española) a nivel estadísticamente representativo, y en circunstancias normales, a fin de conocer de verdad cómo se comporta el parque edificado en tales condiciones de teletrabajo, y cómo perciben los teletrabajadores el espacio de teletrabajo. En los próximos años se podrán conocer tales resultados.

Conclusiones

El teletrabajo ha supuesto un auténtico desafío para los hogares globales, especialmente y de forma disruptiva durante el confinamiento. La situación mostrada en los dos casos de estudio analizados (España y México) refleja su implementación en circunstancias extremas. Esto ha servido de experimento, pero las conclusiones deben tomarse con cautela. La percepción del teletrabajo en los hogares es dispar, según las características del hogar y de la vivienda, el nivel educativo y cultural, y las políticas, estrategias y ayudas por parte de gobiernos e instituciones públicas. Cabría preguntarse si el nivel de satisfacción general estuvo (parcialmente) motivado por su carácter temporal, promovido por las circunstancias, y de excepcionalidad.

Si hemos sido capaces de trabajar así, posiblemente podamos serlo en circunstancias normales. Pero, ¿asumiríamos este reto a largo plazo?

Habría que profundizar más en los pormenores de cada trabajo y su grado de adaptación (Boell *et al.*, 2016). Incluir el trabajo como una tarea más a desarrollar en el hogar (Cuerdo-Vilches, 2020b) podría requerir: revisar el ámbito normativo, tanto para obra nueva como rehabilitación; asegurar un equipamiento y suministros adecuados; y negociar con la entidad empleadora quién asume determinados gastos. A

nivel agregado, políticas sociales sobre teletrabajo, tal y como se están observando en países desarrollados, como en Europa, y establecer mejoras efectivas en la organización y dotación urbanas y rurales, facilitarían la deslocalización laboral en la vivienda. Esto impulsaría una mejor distribución poblacional en la ciudad y el territorio, favoreciendo la implantación de las “ciudades de 15 minutos”, y la reconquista de la España Vacía.

Agradecimientos

Esta publicación se ha realizado como parte de las actividades programadas en el marco del proyecto LINCGLOBAL VIBRA-IS, financiado en la convocatoria 2022 por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), con referencia INCGL20023.

Referencias

- AAVV Madrid, (2021). Las asociaciones vecinales se levantan contra la propuesta de cierre de centros de salud | FRAVM [WWW Document]. URL <https://aavv-madrid.org/noticias/las-asociaciones-vecinales-se-levantan-contr-la-propuesta-de-cierre-de-centros-de-salud/> (consultado 6.14.21).
- Abellán García, A., Aceituno Nieto, P., Allende, A., Andrés, A. de, Arenillas, A., Bartomeus, F., Bastolla, U., Benavides, J., Cabal, B., Castillo Belmonte, A.B., Chica Lara, A., Chiner-Oms, Á., Coderch Negra, M.L., Comas, I., Cuervo-Vilches, T., Damborenea, J. de, Domingo-Calap, P., Durán Heras, M.Á., Etxabe, J., Fernández, A., Fernández Sánchez, C., Fernández Morales, I., Figueras Huerta, A., Giménez Toledo, E., González-Pacanowska, D., Grau, A., Hendriks, I.E., Juste, J., Lafuente, A., Lloret Iglesias, L., López de Alda, M., Maira, J., Manrubia Cuevas, S., Marco, M.P., Martí, E., Martínez Ruiz del Arbol, P., Minguillón, M.C., Montoya, M., Moreno-Arribas, M.V., Navas Martín, M.Á., Nogales, A., Novoa, B., Oteiza San José, I., Pérez de Arenaza Escribano, C., Planas, A.M., Postigo, C., Prieto, C., Pujol Rodríguez, R., Ramasco, J.J., Ramiro Fariñas, D., Revuelta, J., Ribeiro, Á., García, M.R., Rodríguez Rodríguez, V., Rodríguez-Tarduchy, G., Rubio, V., Mantecón, Á.R., Sánchez Moragas, G., Sanz, A., Vilà, M., Zúñiga Lucas, S., Val, M. del, Mellado, M., Alcamí, A., Benlloch Baviera, J.M., Sánchez-Puelles, J.M., Marco, J., (2021). Una visión global de la pandemia COVID-19: qué sabemos y qué estamos investigando desde el CSIC. Inf. Elabor. desde la Plataforma Temática Interdiscip. Salud Glob. Heal. del CSIC.
- Aguilera, A., Lethiais, V., Rallet, A., Proulhac, L., (2016). Home-based telework in France: Characteristics, barriers and perspectives. Transp. Res. Part A Policy Pract. 92, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.021>
- Anghel, B., Cozzolino, M., Lacuesta, A., (2020). El teletrabajo en España.

- Bajzikova, L., Sajgalikova, H., Wojcak, E., Polakova, M., (2016). How Far is Contract and Employee Telework Implemented in SMEs and Large Enterprises? (Case of Slovakia). *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 235, 420–426. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.11.052>
- Belzunegui-Eraso, A., Erro-Garcés, A., (2020). Teleworking in the Context of the Covid-19 Crisis. *Sustainability* 12, 3662. <https://doi.org/10.3390/su12093662>
- Biasi, M., 2020. Covid-19 and labour law in Italy. *Eur. Labour Law J.* 11, 306–313. <https://doi.org/10.1177/2031952520934569>
- Boell, S.K., Cecez-Kecmanovic, D., Campbell, J., (2016). Telework paradoxes and practices: the importance of the nature of work. *New Technol. Work Employ.* 31, 114–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ntwe.12063>
- Brooks, S.K., Webster, R.K., Smith, L.E., Woodland, L., Wessely, S., Greenberg, N., Rubin, G.J., (2020). The psychological impact of quarantine and how to reduce it: rapid review of the evidence. *Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30460-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30460-8)
- Coenen, M., Kok, R.A.W., (2014). Workplace flexibility and new product development performance: The role of telework and flexible work schedules. *Eur. Manag. J.* 32, 564–576. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2013.12.003>
- Copes, H., Tchoula, W., Brookman, F., Ragland, J., (2018). Photo-Elicitation Interviews with Vulnerable Populations: Practical and Ethical Considerations. *Deviant Behav.* 39, 475–494. <https://doi.org/10.1080/01639625.2017.1407109>
- COVID-HAB, s/f. Confinamiento, vivienda y habitabilidad. URL <https://covidhab.ietcc.csic.es/> (consultado 1.27.21).
- Cubillos, R.A., (2017). Los retos en la vivienda del siglo XXI., en: Molar, M.E., Roux, R.S. (Eds.), . Universidad Autónoma de Coahuila.
- Cuerdo-Vilches, T., (2020a). Teletrabajar en tiempos de COVID-19: ¿están nuestros hogares preparados? *The Conversation España*.
- Cuerdo-Vilches, T., (2020b). Repensar la vivienda tras la pandemia. *The Conversation España*.
- Cuerdo-Vilches, T., Navas-Martín, M.Á., March, S., Oteiza, I., (2021a). Adequacy of telework spaces in homes during the lockdown in Madrid, according to socio-economic factors and home features. *Sustain. Cities Soc.* 75, 103262. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103262>
- Cuerdo-Vilches, T., Navas-Martín, M.Á., Navas-Martín, M., (2020a). Estudio [COVID-HAB-PAC]: un enfoque cualitativo sobre el confinamiento social (COVID-19), vivienda y habitabilidad en pacientes crónicos y su entorno. *Paraninfo Digit.* e32075o-e32075o.

- Cuerdo-Vilches, T., Navas-Martín, M.Á., Oteiza, I., (2021b). Working from Home: Is Our Housing Ready? *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 7329. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147329>
- Cuerdo-Vilches, T., Navas-Martín, M.Á., Oteiza, I., (2020b). A Mixed Approach on Resilience of Spanish Dwellings and Households during COVID-19 Lockdown. *Sustainability* 12, 10198. <https://doi.org/10.3390/su122310198>
- De Abreu e Silva, J., Melo, P.C., (2018). Does home-based telework reduce household total travel? A path analysis using single and two worker British households. *J. Transp. Geogr.* 73, 148–162. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.10.009>
- Dodds, S., Hess, A.C., (2020). Adapting research methodology during COVID-19: lessons for transformative service research. *J. Serv. Manag.* <https://doi.org/10.1108/JOSM-05-2020-0153>
- Feng, Z., Savani, K., (2020). Covid-19 created a gender gap in perceived work productivity and job satisfaction: implications for dual-career parents working from home. *Gend. Manag.* <https://doi.org/10.1108/GM-07-2020-0202>
- Giovanis, E., (2018). The relationship between teleworking, traffic and air pollution. *Atmos. Pollut. Res.* 9, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.06.004>
- Gobierno de España, (2020a). Real Decreto-ley 28/2020, de 22 de septiembre, de trabajo a distancia.
- Gobierno de España, (2020b). Real Decreto-Ley 29/2020, de 29 de Septiembre, de Medidas Urgentes en Materia de Teletrabajo en las Administraciones Públicas y de Recursos Humanos en el Sistema Nacional de Salud Para Hacer Frente a la Crisis Sanitaria Ocasionada Por la COVID-19.
- Gobierno de España, (2020c). Real Decreto 463/2020, de 14 de marzo, por el que se declara el estado de alarma para la gestión de la situación de crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19.
- Groen, B.A.C., van Triest, S.P., Coers, M., Wtenweerde, N., (2018). Managing flexible work arrangements: Teleworking and output controls. *Eur. Manag. J.* 36, 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2018.01.007>
- Guerin, T.F., (2021). Policies to minimise environmental and rebound effects from telework: A study for Australia. *Environ. Innov. Soc. Transitions* 39, 18–33. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2021.01.003>
- Hamadani, J.D., Hasan, M.I., Baldi, A.J., Hossain, S.J., Shiraji, S., Bhuiyan, M.S.A., Mehrin, S.F., Fisher, J., Tofail, F., Tipu, S.M.M.U., Grantham-McGregor, S., Biggs, B.A., Braat, S., Pasricha, S.R., (2020). Immediate impact of stay-at-home orders to control COVID-19 transmission on socioeconomic conditions, food insecurity, mental health, and intimate partner violence in Bangladeshi women and their families: an interrupted time series. *Lancet Glob. Heal.* [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30366-1](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30366-1)

- Hynes, M., (2016). Developing (tele)work? A multi-level sociotechnical perspective of telework in Ireland. *Res. Transp. Econ.* 57, 21–31. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2016.06.008>
- Instituto Nacional de Estadística, (2021). Nota de prensa Encuesta de Población Activa (EPA).
- Jaimes Torres, M., Aguilera Portillo, M., Cuervo-Vilches, T., Oteiza, I., Navas-Martín, M.Á., (2021). Habitability, Resilience, and Satisfaction in Mexican Homes to COVID-19 Pandemic. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 6993. <https://doi.org/10.3390/ijerph18136993>
- Kazekami, S., (2020). Mechanisms to improve labor productivity by performing telework. *Telecomm. Policy* 44, 101868. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.101868>
- Kodama, M., (2020). Digitally transforming work styles in an era of infectious disease. *Int. J. Inf. Manage.* 55, 102172. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102172>
- Moeckel, R., (2017). Working from Home: Modeling the Impact of Telework on Transportation and Land Use, en: *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., pp. 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.07.021>
- Moeckel, R., Heilig, M., Hilgert, T., Kagerbauer, M., (2020). Benefits of Integrating Microscopic Land Use and Travel Demand Models: Location Choice, Time Use & Stability of Travel Behavior, en: *Transportation Research Procedia*. Elsevier B.V., pp. 1956–1967. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.226>
- Navas-Martín, M.Á., Cuervo-Vilches, T., (2023). A Visual-Emotional Analysis of Perception in the Homes of Chronic Patients during Confinement by COVID-19 in Spain. *Archit.* 2023, Vol. 3, Pages 107-127 3, 107–127. <https://doi.org/10.3390/ARCHITECTURE3010008>
- Oliver, N., Barber, X., Roomp, Kirsten, Roomp, Kristof, (2020). Assessing the impact of the COVID-19 pandemic in Spain: Large-scale, online, self-reported population survey. *J. Med. Internet Res.* 22, e21319. <https://doi.org/10.2196/21319>
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, (2020). Respuestas políticas de las ciudades al COVID-19.
- Palomino, J.C., Rodríguez, J.G., Sebastian, R., (2020). Wage inequality and poverty effects of lockdown and social distancing in Europe. *Eur. Econ. Rev.* 129. <https://doi.org/10.1016/j.eurocorev.2020.103564>
- RAMUCA, (2020). Primer informe. Sevilla.
- Red de Unidades de Igualdad de Género para la Excelencia Universitaria, (2021). Teletrabajo y conciliación corresponsable. En tiempos de Covid-19. Guía de buenas prácticas para las universidades.

- Rietveld, P., (2011). Telework and the transition to lower energy use in transport: On the relevance of rebound effects. *Environ. Innov. Soc. Transitions* 1, 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.03.002>
- Samsuni, S., Mulyono, S., Wiarsih, W., Heni Kusumawardani, L., (2019). Photovoice interactive media improves the personal hygiene of teenage students at pesantren school in Tangerang. *Enferm. Clin.* <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2019.04.104>
- Sánchez-Ledesma, E., Vásquez-Vera, H., Sagarra, N., Peralta, A., Porthé, V., Díez, È., (2020). Perceived pathways between tourism gentrification and health: A participatory Photovoice study in the Gòtic neighborhood in Barcelona. *Soc. Sci. Med.* 258. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2020.113095>
- Silva-C, A., Montoya R, I.A., Valencia A, J.A., (2019). The attitude of managers toward telework, why is it so difficult to adopt it in organizations? *Technol. Soc.* 59, 101133. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2019.04.009>
- Sostero, M., Milasi, S., Hurley, J., Fernández-Macías, E., Bisello, M., (2020). Teleworkability and the COVID-19 crisis: a new digital divide? Seville.
- United Nations, 2020. The Impact of COVID-19 on Women, United Nations.
- Ur Rahman, I., Jian, D., Junrong, L., Shafi, M., (2021). Socio-economic status, resilience, and vulnerability of households under COVID-19: Case of village-level data in Sichuan province. *PLoS One* 16, e0249270. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249270>
- Zhang, S., Moeckel, R., Moreno, A.T., Shuai, B., Gao, J., (2020). A work-life conflict perspective on telework. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 141, 51–68. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.09.007>

Capítulo 3

Incidencia de los Extremos Térmicos Sobre la Mortalidad Diaria a Diferentes Escalas en España: Análisis Comparado entre las Áreas Rurales y Urbanas

José Antonio López-Bueno, Julio Díaz, Cristina Linares y Miguel Ángel Navas-Martín

Unidad de Referencia en Cambio Climático, Salud y Medio Ambiente Urbano. Escuela Nacional de Sanidad, Instituto de Salud Carlos III

Correo electrónico: jalopez@isciii.es

Resumen

El objetivo fue analizar y cuantificar la vulnerabilidad a los extremos térmicos en áreas rurales y urbanas de España.

Para ello se realizaron estudios retrospectivos de series temporales y diseño ecológico. Se realizaron análisis en diferentes escalas geográficas, incluyendo distritos de Madrid y varias provincias. La variable dependiente principal fue la tasa de mortalidad por causas naturales diaria por millón de habitantes. Como variables dependientes principales fueron utilizada la temperatura diaria máxima (t_{max}) y mínima (t_{min}). Por medio de estas fueron determinadas las temperaturas umbrales extremas, asociadas con tasa de mortalidad diaria estadísticamente superior a la media estacional, para el invierno (olas de frío) y verano (olas de calor). A continuación, a partir de estos umbrales se estimó la vulnerabilidad estimada para las olas de calor y frío en las poblaciones estudiadas. Por último, se analizó mediante Modelos Generalizados de Regresión Lineal (GLM) y Modelos Mixtos (MM) la asociación entre la vulnerabilidad hallada y distintos indicadores socioeconómicos como son la ruralidad o índice de privación o pobreza.

Los resultados muestran que la evolución temporal de las temperaturas extremas de calor y de frío se corresponde en ambos casos con escenarios de adaptación.

Aparentemente, el territorio rural ofrece efecto protector sobre las poblaciones analizadas tanto para el frío como para el calor. Así mismo, los resultados apuntan a que la calidad de la vivienda y un mayor estatus económico son factores protectores relevantes.

En conclusión, se destaca la necesidad de políticas y planes de prevención en salud pública que consideren la vulnerabilidad diferencial entre áreas rurales y urbanas. Los resultados proporcionan información relevante para el diseño de estrategias de adaptación al cambio climático en España.

Palabras clave: ola de calor, ola de frío, pobreza, ruralidad, mortalidad.

Abstract

The objective was to analyse and quantify vulnerability to thermal extremes in rural and urban areas of Spain.

For this purpose, retrospective time series and ecological design studies were carried out. Analyses were carried out at different geographical scales, including districts of Madrid and several provinces. The main dependent variable was the daily natural mortality rate per million inhabitants. Daily maximum (tmax) and minimum (tmin) temperatures were used as main dependent variables. These were used to determine the extreme threshold temperatures, associated with daily mortality rates statistically higher than the seasonal average, for winter (cold waves) and summer (heat waves). Then, based on these thresholds, the estimated vulnerability to heat and cold waves in the populations studied was estimated. Finally, the association between the vulnerability found and different socio-economic indicators such as rurality or deprivation or poverty index was analysed using Generalised Linear Regression Models (GLM) and Mixed Models (MM).

The results show that the temporal evolution of extreme heat and cold temperatures corresponds in both cases to adaptation scenarios.

Apparently, the rural territory has a protective effect on the populations analysed for both cold and heat. Likewise, the results suggest that housing quality and higher economic status are relevant protective factors.

In conclusion, the need for public health prevention policies and plans that consider the differential vulnerability between rural and urban areas is highlighted. The results provide relevant information for the design of climate change adaptation strategies in Spain.

Key words: heat wave, cold wave, poverty, rurality, mortality.

Introducción

En 2022 España sufrió el verano más intenso del siglo (AEMET, 2022), destacando al menos tres olas de calor distintas ocurridas en los meses de junio (del 9 a 26), julio (12 al 18) y agosto (del 30 de julio al 15 de agosto): por intensidad, extensión y duración de estos episodios se trata de un verano histórico en la región. La temperatura media alcanzó los 24 °C, una anomalía de 2,2 °C más que la media de la estación en el periodo de referencia (1961-2010).

Estas temperaturas récord han dejado su impronta en los registros de mortalidad. Durante el verano de 2022 se han registrado 25.065 defunciones más de las esperadas por el sistema de monitorización de la mortalidad diaria (MoMo) por todas las causas de España (ISCIII, 2022). Estas cifras de sobremortalidad superan las del verano de 2020, especialmente marcado por el arranque de la segunda ola de la pandemia de *Coronavirus Disease 2019* (COVID-19).

Aunque desde el ámbito epidemiológico aún no se ha podido dar una explicación concluyente de las causas de toda esa sobremortalidad, el equipo del MoMo (Sistema de monitorización de la mortalidad diaria por todas las causas) especializado en el seguimiento del impacto de las altas temperaturas en la salud (MoMoTemp) estima que unas 4.801 podrían ser atribuibles a las altas temperaturas.

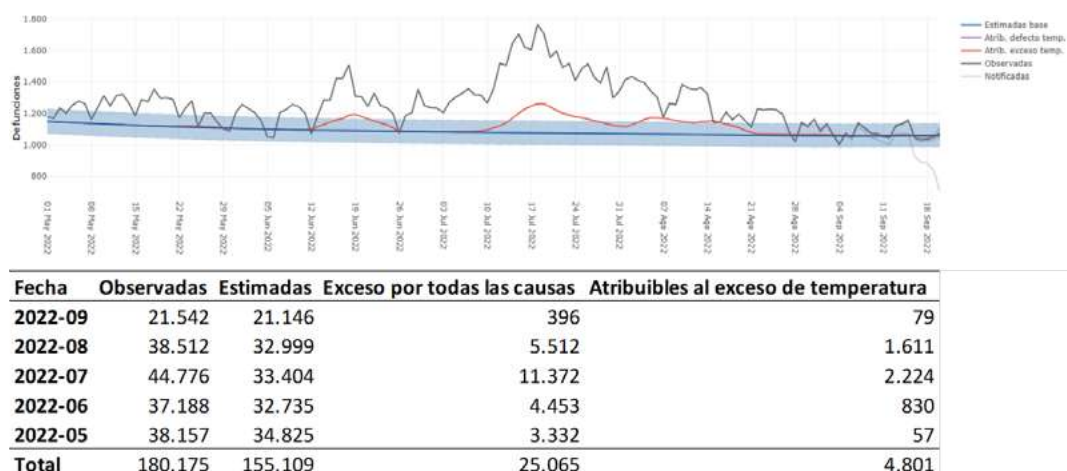


Figura 1. Monitorización del exceso de mortalidad entre los meses de mayo y septiembre del año 2022. La línea azul y su banda de confianza representan el canal epidemiológico de mortalidad esperada. En morado se representa la mortalidad observada. El exceso de mortalidad por todas las causas es el exceso de mortalidad cuando la mortalidad observada transgrede el canal epidemiológico. En rojo, se representa la estimación del MoMo de mortalidad atribuible a al exceso de temperatura.

Fuente: Momo (ISCI, 2022).

En cuanto a las temperaturas extremadamente bajas, entre el 5 y 8 de enero de 2021 se sufrió la ola de frío generada por la borrasca Filomena (AEMET, 2021; ISCI, 2022). Esta dio lugar a niveles de nieve históricos en muchas zonas, especialmente en el interior. En Madrid la nieve, de 20 cm de espesor, llegó a colapsar la ciudad. En cuanto a la mortalidad asociada con esta ola de frío, el balance final fue de un exceso de mortalidad sobre lo esperado de 14.358 defunciones, 2.042 atribuibles a las bajas temperaturas entre los meses de enero y febrero de ese año.

Las situaciones descritas probablemente son la mejor ilustración del interés que despierta el estudio del efecto de las temperaturas extremas en salud, sus implicaciones y su valor práctico en el diseño de políticas y planes de prevención en salud pública frente a las temperaturas extremas; así como las propuestas de mejora y los aspectos en los que la epidemiología ambiental deben profundizar.

Los riesgos en salud asociados con las temperaturas extremas no son un asunto novedoso en la literatura científica y existe una evidencia incontestable que atribuye a los extremos térmicos una gran cantidad de mortalidad prematura (Díaz et al., 2019; Follos et al., 2020; Linares and Díaz, 2008). Especialmente estudiados han sido los efectos en salud de las olas de calor; menos atención han recibido los riesgos en salud pública asociados con las olas de frío (López-Bueno et al., 2022b).

Sin embargo, el enfoque clásico de estas investigaciones ha sido el análisis de grandes poblaciones urbanas, grandes provincias; o incluso estudios nacionales, en los que los resultados están muy condicionados por las poblaciones urbanas debido a su peso demográfico.

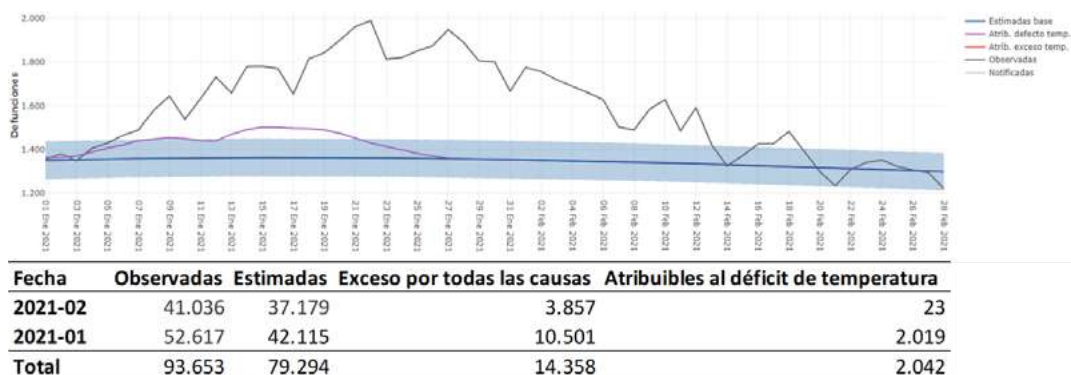


Figura 2. Monitorización del exceso de mortalidad entre los meses de enero y febrero del año 2021. La línea azul oscuro y su banda de confianza representan el canal epidemiológico de mortalidad esperada. En morado se representa la mortalidad observada. El exceso de mortalidad por todas las causas es el exceso de mortalidad cuando la mortalidad observada transgrede el canal epidemiológico. En azul claro, se representa la estimación del MoMo de mortalidad atribuible al déficit de temperatura.

Fuente: Momo (ISCIH, 2022).

Partiendo de esta situación, se planteó el objetivo general de analizar y cuantificar la vulnerabilidad de mortalidad diaria por causas naturales atribuible al efecto de las temperaturas extremas en población rural y urbana de la España peninsular.

Para abordar esta hipótesis general, la investigación parte de dos hipótesis de trabajo. En primer lugar, que existe un riesgo significativo y atribuible a los extremos térmicos —olas de calor y frío— sobre el aumento de la mortalidad diaria en las poblaciones estudiadas. La segunda hipótesis es que existe una vulnerabilidad diferencial entre poblaciones rurales y urbanas, y que las poblaciones urbanas son más vulnerables que las poblaciones rurales.

Para testar estas hipótesis el objetivo general de la investigación se ha desglosado en los siguientes objetivos específicos:

El primer objetivo específico fue la determinación de las temperaturas umbrales de definición de calor y frío extremos. Todas las temperaturas umbrales que ha sido necesario calcular en las distintas investigaciones fueron determinadas en función de la mortalidad diaria por causas naturales (Códigos CIE- 10: A00-R99).

En segundo lugar, analizar la evolución temporal de los umbrales de ola de calor y ola de frío entre los años 1983-2018 para establecer si los resultados se corresponden con un escenario de adaptación o un escenario de no adaptación a las temperaturas extremas.

Tercero, cuantificación de la vulnerabilidad a los extremos térmicos a través del cálculo de los Riesgos Relativos (RR) de mortalidad asociados con los episodios de calor y frío extremo en los distritos de Madrid.

En cuarto lugar, la cuantificación de la vulnerabilidad a los extremos térmicos a través del cálculo de los percentiles umbrales de ola de calor y frío extremo en las poblaciones rurales y urbanas seleccionadas para cada provincia incluida en el estudio.

Por último, a la vista de los resultados, evaluar las diferentes estrategias de adaptación de la población rural o urbana dentro del contexto de cambio climático en España.

Material y métodos

Todos los análisis realizados fueron estudios retrospectivos de series temporales y diseño ecológico. La principal variable dependiente fue la mortalidad por causas naturales (tasas de mortalidad por millón de habitantes), por ser este un indicador de salud rigurosamente registrado. Las variables independientes principales fueron las temperaturas máximas y mínimas diarias, dado que presentan un mejor comportamiento estadístico con la mortalidad estival e invernal respectivamente.

Todos los estudios fueron realizados sobre 10 provincias representativas empleando datos agregados de población a dos niveles alternativos: nivel provincial o por regiones climáticas subprovinciales (zonas isoclimáticas). Estas 10 provincias fueron: Sevilla, Zaragoza, Asturias, Valladolid, Barcelona, Badajoz, Ourense, Madrid, Gipuzkoa y Alicante.

En primer lugar, se analizó la evolución temporal de las temperaturas umbrales de ola de calor y frío utilizando la serie temporal 01/01/1983-31/12/2018 (J. A. López-Bueno *et al.*, 2021; López-Bueno *et al.*, 2022a). Luego, se estudió la vulnerabilidad en zonas rurales y urbanas con la serie temporal 01/01/2000-31/12/2013 (J. López-Bueno *et al.*, 2021c, 2021a, 2021b; López-Bueno *et al.*, 2020a, 2020b, 2022b).

Dentro de este segundo tipo de estudios se analizó el efecto del calor y del frío extremo en los distritos de Madrid (López-Bueno *et al.*, 2020a, 2020b).

A continuación, se analizó el impacto en salud del frío y calor extremo en la provincia de Madrid (J. López-Bueno *et al.*, 2021c, 2021a). Esta provincia quedó agrupada en 4 unidades muestrales en función de la zona isoclimática y su clasificación rural urbana. Las primeras de estas zonas fueron definidas por AEMET (Roldán, J, 2011) y las segundas por Eurostat (Eurostat, 2021).

Así, según los dos criterios comentados la población de Madrid se pudo agrupar en cuatro unidades muestrales: Centro Urbano y Metropolitano (UMC), Sierra Norte Rural (NRM), Centro Rural (RC) y Rural Sur (SR); tomándose estas abreviaturas por sus siglas en inglés.

Por último, se analizó la vulnerabilidad de los extremos térmicos en las 10 provincias inicialmente seleccionadas (J. López-Bueno *et al.*, 2021b; López-Bueno *et al.*, 2022b). Siguiendo el mismo sistema que para la provincia de Madrid, la población incluida en el estudio fue clasificada en función de su zona isoclimática y su clasificación rural-urbana. Como resultante, surgieron 42 unidades muestrales.

La determinación de las mencionadas temperaturas umbrales de calor y frío extremo siguió metodología consolidada (Díaz *et al.*, 2023), y que adopta el Ministerio de Sanidad para diseñar los planes de prevención frente al exceso de temperaturas. Esta se basa en hallar asociación entre anomalías de mortalidad y temperatura (MSAN, 2023). Para ello se ajustaron modelos de la familia Box-Jenkins controlados por estacionalidad y empleando la mortalidad como variable dependiente. Este pretratamiento permite sustraer a los datos de mortalidad sus estacionalidades, componente autorregresiva y tendencias y con ello, nos permite establecer que las asociaciones encontradas entre las anomalías de mortalidad y la temperatura no se deben a simples coincidencias espurias debidas a manifestar perfiles temporales cíclicos casualmente asimilables entre sí.

Una vez conocidas las temperaturas umbrales de extremo térmico, se han calculado Riesgos Relativos (RR) y Riesgos Atribuibles (RA) mediante modelos lineales de la familia poisson ($\text{link} = \ln$).

Así mismo, las propias temperaturas umbrales dan una medida de vulnerabilidad relativa a las temperaturas extremas cuando estas son transformadas en percentiles de temperatura. Por ello, se han empleado MM para estimar el efecto modulador de factores meteorológicos, climáticos o socioeconómicos, así como para determinar el papel protector o de riesgo de la ruralidad de la población.

Una descripción más detallada de la metodología puede consultarse en la literatura (J. López-Bueno *et al.*, 2021c, 2021a, 2021b; López-Bueno *et al.*, 2020a, 2020b, 2022b, 2022a; J. A. López-Bueno *et al.*, 2021).

Resultados y discusión

En cuanto a los resultados principales y conclusiones, se puede enumerar lo siguiente: en general, las temperaturas umbrales de calor extremo están creciendo. En particular, las temperaturas máximas diarias parecen crecer a un ritmo menor que las temperaturas umbrales (0,41 °C/década frente a 0,57 °C/década) (Tabla 1) (J. A. López-Bueno *et al.*, 2021). Es decir, que parece que la población se ha ido adaptando al calentamiento global en España. A nivel regional, la única provincia estudiada que escapa a esta tendencia positiva es Badajoz. Y si las tendencias actuales se mantienen, en el futuro tampoco se adaptará Alicante.

Tradicionalmente ha sido empleado como indicador de adaptación a la temperatura las temperaturas de confort, o también llamadas Temperaturas de Mínima Mortalidad (TMM). La investigación desarrollada indica que las temperaturas umbrales también son buenos indicadores de adaptación, tanto como las propias TMM.

Tabla 1. Resultados del modelo de regresión mixto para determinar el incremento anual en la temperatura umbral de calor extremo para todas las regiones consideradas.

	β	sd	WALD	pvalor
Intercepto	-80,1230	54,5602	2,16	0,142
Año	0,0574	0,0271	4,49	0,034*

Fuente: (J. A. López-Bueno *et al.*, 2021).

En el caso de las olas de frío, globalmente las temperaturas mínimas diarias (Tmin) crecen a un ritmo de 0,2 °C/década (Tabla 2) (López-Bueno *et al.*, 2022a), sin embargo, no se ha podido demostrar un crecimiento estadísticamente significativo de las temperaturas umbrales de ola de frío. Dado que las temperaturas umbrales de frío extremo se mantienen estables a la par que las mínimas diarias se vuelven menos intensas, parece que también se avanza hacia un proceso de adaptación en relación con las olas de frío, pero menos claro que en el caso del calor.

Tabla 2. Tendencias por década encontradas para las temperaturas mínimas diarias (Tmin) y temperaturas umbrales de la ola de frío.

Provincia	Tendencia de Tmin (°C/década)	Tendencia de Tumbral (°C/Década)
Alicante	0,0 (-0,3; 0,3)	0,5 (0,0; 1,0)
Asturias	0,0 (-0,2; 0,2)	-0,3 (-1,0; 0,5)
Badajoz	-1,0 (-3,9; 1,9)	0,0 (-0,6; 0,7)
Barcelona	0,5 (0,1; 0,9) *	0,7 (0,1; 1,3)*
Vizcaya	0,2 (0,0; 0,5)*	-0,5 (-1,1; 0,1)
Madrid	0,1 (-0,2; 0,3)	0,2 (-0,4; 0,8)
Ourense	0,0 (-0,2; 0,2)	-0,1 (-0,6; 0,4)
Sevilla	0,2 (-0,1; 0,5)	0,0 (-0,9; 0,9)
Valladolid	0,0 (-0,3; 0,2)	0,6 (0,1; 1,1)*
Zaragoza	0,2 (0,0; 0,4)	0,3 (-0,5; 1,2)
Global	0,2 (0,1; 0,3)*	0,1 (-0,1; 0,3)

Fuente: (López-Bueno *et al.*, 2022a).

En cuanto a la distribución geográfica de los riesgos, se detectó efecto de las olas de calor solo en 3 distritos de la ciudad de Madrid (Figura 3) (J. López-Bueno *et al.*, 2021c). Estos efectos son fundamentalmente a corto plazo. Los distritos que expe-

rimentan estos efectos son Tetuán, Carabanchel y Puente de Vallecas. Al analizar la distribución de los riesgos, estos decrecen con la renta y aumentan con la edad y la ausencia de refrigeración (López-Bueno *et al.*, 2020a).

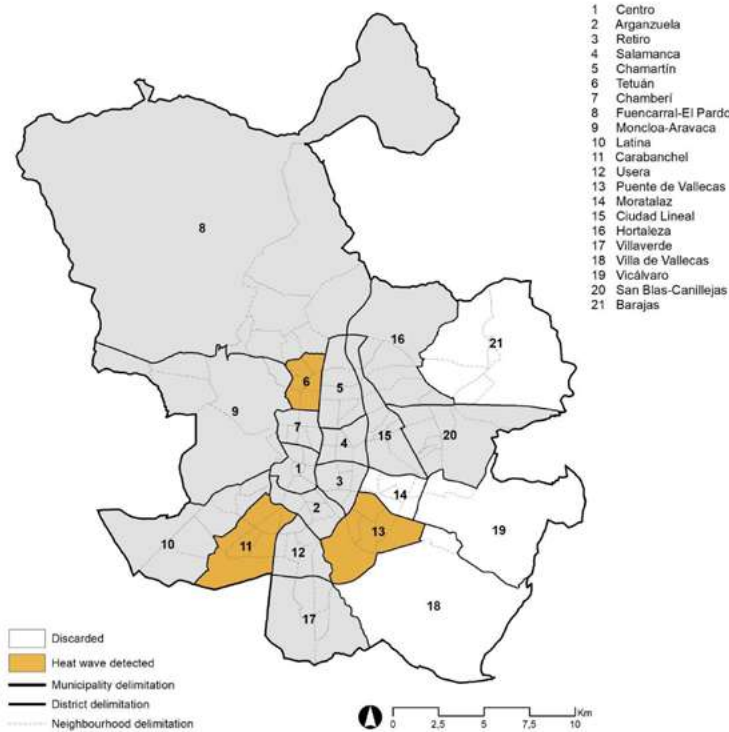


Figura 3. Distribución de riesgos encontrados por distrito y día de ola de calor.

Fuente: (J. López-Bueno *et al.*, 2021c).

Encontramos riesgos por ola de frío estadísticamente significativos en más distritos que por ola de calor (Figura 4), y su efecto es a medio (retardos 3-5) y largo plazo (retardos 7-14). En los distritos de Madrid los efectos en salud de las olas de frío crecen claramente con el porcentaje de mayores de 65 años y el porcentaje de viviendas sin calefacción. En cuanto a la renta, se ha demostrado una mayor fracción diaria de mortalidad atribuible al frío extremo en los distritos de menor renta (López-Bueno *et al.*, 2020b).

A nivel de provincia de Madrid, el centro metropolitano fue la zona cuya población es más vulnerable a las olas de calor (J. López-Bueno *et al.*, 2021c). Esto se manifiesta en los percentiles umbrales de ola de calor. En cuanto al efecto retardado en el tiempo, este se manifiesta en el corto plazo (retardos 0,1 y 2). Por otro lado, la vulnerabilidad diferencial entre las zonas rurales y urbanas se manifiesta por medio de las temperaturas umbrales de ola de calor en los distintos grupos y las mayores o menores frecuencias de eventos que se desprenden de ellos.

En la provincia de Madrid se identifican con claridad dos zonas de mayor vulnerabilidad a las olas de calor: el centro metropolitano urbano, y el sur rural y periurbano (J. López-Bueno *et al.*, 2021c). Parece que esta vulnerabilidad se relaciona con la distribución de la población mayor de 65 años y con la distribución de la pobreza en el territorio.

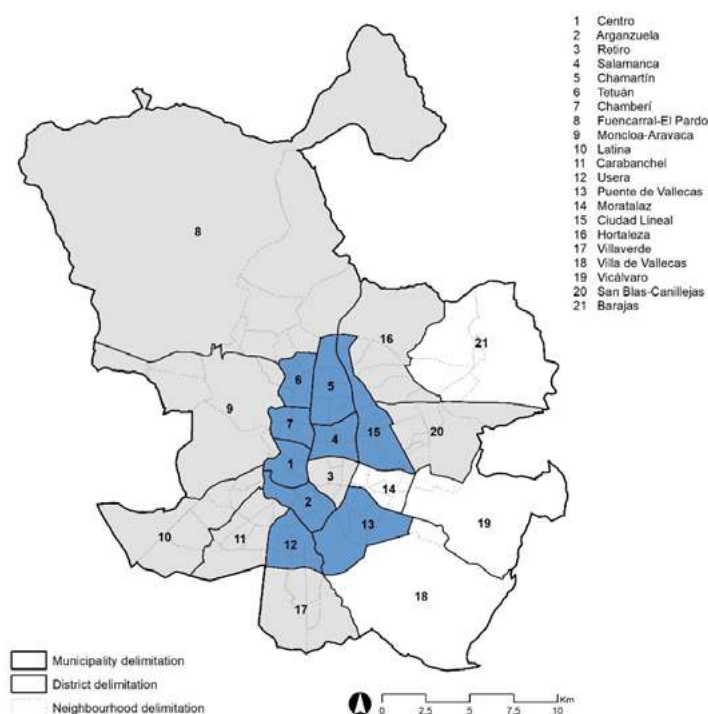


Figura 4. Mapa de Madrid que representa destacando en azul aquellos distritos dónde ha sido detectado impacto de la ola de frío. Los distritos en blanco representan aquellos que no entraron en el estudio.

Fuente: (J. López-Bueno *et al.*, 2021a).

En el caso del frío extremo se repite el mismo patrón de vulnerabilidad encontrado que para el calor (J. López-Bueno *et al.*, 2021a). En el centro y norte se observa un efecto a corto y largo plazo. En el centro rural a medio plazo y en la zona sur a largo plazo. El número de días de frío extremo (ECD) que sufre el centro urbano es superior al que sufre la periferia rural (585 vs. 319)(J. López-Bueno *et al.*, 2021a). Además, se ha podido comprobar en este estudio que el efecto confusor de la gripe es despreciable al estimar el impacto de las temperaturas extremadamente bajas.

En la provincia de Madrid la vulnerabilidad al frío extremo fue mayor que al calor extremo. Esto se manifiesta por el número de eventos de cada fenómeno (1542 olas de frío vs. 1130 olas de calor)(J. López-Bueno *et al.*, 2021a).

Para el frío extremo, la pobreza —o privación— y porcentaje de mayores de 65 años fueron factores de riesgo. La calidad y rehabilitación de la vivienda son factores protectores. Pero entre las variables socioeconómicas, la más determinante para el frío extremo en Madrid resultó ser la rehabilitación de vivienda.

Al analizar las 10 provincias de estudio por zonas isoclimáticas y rural-urbanas, la tasa de mortalidad es mayor en las zonas urbanas que en las rurales (López-Bueno *et al.*, 2022b).

Globalmente, el nivel de adaptación al calor medio se sitúa en el percentil 91 (Figura 5) (J. López-Bueno *et al.*, 2021b). En 9 de los 42 grupos no se han detectado aumentos de mortalidad asociados con calor extremo. De esos 9 grupos, solo uno es urbano (la zona urbana de Valladolid).

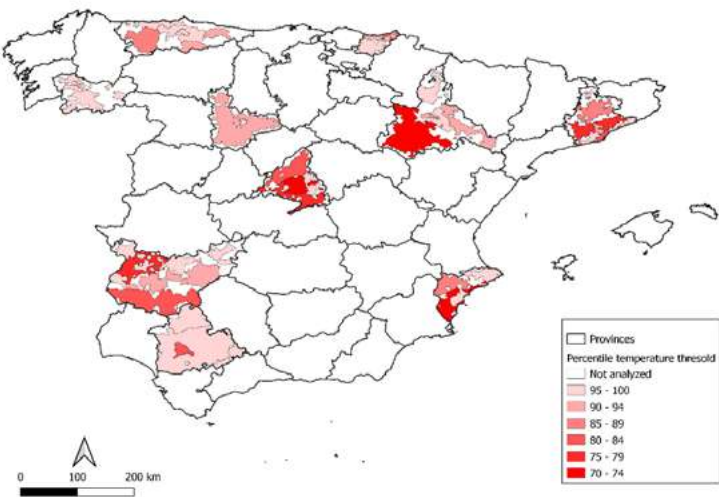


Figura 5. Mapa de la distribución de vulnerabilidad al calor en las provincias analizadas.

Fuente: (J. López-Bueno *et al.*, 2021b).

Descriptivamente se observa que los percentiles umbrales son mayores (menor vulnerabilidad relativa) dónde la exposición es mayor. Esta es una manifestación típica de la adaptación.

La ruralidad de la población parece actuar como factor protector frente al calor extremo a nivel de la España peninsular (Tabla 3). Junto con ella, la no aridez de la zona isoclimática. Por el contrario, fueron factores de riesgo las zonas cuyos veranos son frescos y la pobreza y la vivienda cuyo estado es en declive.

Tabla 3. Modelos de regresión generalizados mixtos ajustados por tipos de variables y modelo general controlado para analizar la vulnerabilidad a las olas de frío en las zonas rurales y urbanas de la España peninsular. Variable dependiente: Vulnerabilidad_{frío}.

variable	rol	β	Error estánda	z	Pr(> z)	RR	IC95	
Balance hídrico	Protective			-				
	Factor	-1,7731	0,48912	3,625	0,00	5,89	2,26	15,36
Ruralidad	Protective		-	-				
	Factor	0,34646	0,13208	2,623	0,01	1,41	1,09	1,83
Verano fresco	Risk Factor	0,99079	0,40061	2,473	0,01	2,69	1,23	5,91
IP	Risk Factor	1,39794	0,38384	3,642	0,00	4,05	1,91	8,59
Vivienda en declive	Risk Factor	0,12471	0,04573	2,727	0,01	1,13	1,04	1,24

Fuente: (López-Bueno *et al.*, 2022b).

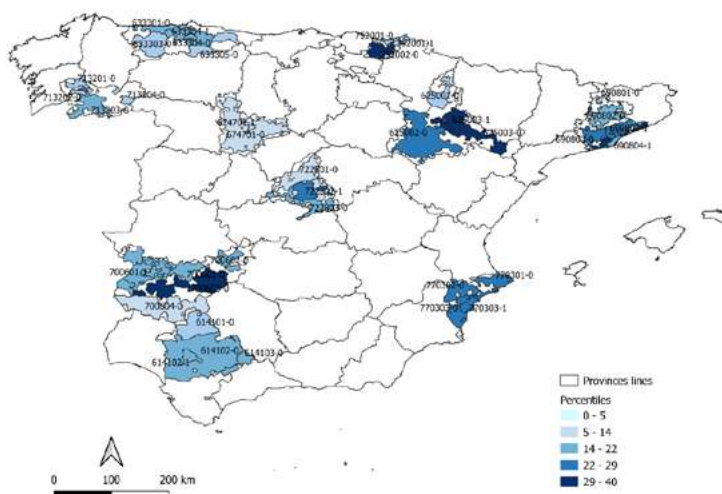


Figura 6. Mapa de la distribución geográfica de los percentiles umbrales de ola de frío encontrados.

Fuente: (J. López-Bueno *et al.*, 2021b).

Para las olas de frío, el nivel de vulnerabilidad promedio se sitúa en el percentil 18 (López-Bueno *et al.*, 2022b). Los modelos indican que en el caso de las olas de frío las variables meteorológicas son menos determinantes que las socioeconómicas. Teniendo esto presente, se encontró mayor vulnerabilidad al frío donde las temperaturas son más elevadas.

En cuanto las variables sociodemográficas, alcanzaron un valor estadísticamente significativo (p -valor $< 0,05$) el desempleo y el índice de ruralidad. Es más, estas fueron las variables más determinantes, por ser las que desplazan al resto en el modelo global (Tabla 4).

Tabla 4. Modelo de regresión de Poisson y Riesgos Relativos (RR) y Atribuibles (RA) de vulnerabilidad a la ola de calor. Variable dependiente: Vulnerabilidad_{calor}.

		β	sd	z	$p > z $	IC95%	
Modelo de variables meteorológicas	Tmin	3,6	0,5	7,66	0,000	2,7	4,6
	Desempleo	0,4	0,1	5,11	0,000	0,3	0,6
Modelo de variables socioeconómicas	Ruralidad	-6,1	2,0	-2,98	0,005	-	-
						10,2	2,0
Modelo de vivienda	MalalT	0,5	0,0	11,65	0,000	0,5	0,6
	Desempleo	0,4	0,1	5,11	0,000	0,3	0,6
Modelo general ajustado	Ruralidad	-6,1	2,0	-2,98	0,005	-	-
						10,2	2,0

Fuente: (J. López-Bueno *et al.*, 2021b).

En la España Peninsular, el índice de ruralidad actúa como factor protector frente al frío extremo. Es decir, ocurre lo mismo que fue observado para el calor extremo. En cambio, el desempleo se asoció con mayores riesgos.

En cuanto a la comparación de las olas de calor con las olas de frío, la población es en promedio un 9,64% más vulnerable a las olas de frío que a las olas de calor (Figura 6).

En definitiva, este trabajo de investigación concluye que las zonas urbanas de la España peninsular son más vulnerables que la población rural a ambos extremos meteorológicos. Este hallazgo supone la confirmación de las hipótesis de partida del estudio.

Estos resultados se deben extrapolar a otros países con mucha cautela, y en ningún caso más allá de países similares de la Unión Europea. Se debe tener en consideración que la categoría rural-urbana de la población actúa como representante de una determinada estructura socioeconómica y demográfica compleja; y que puede llegar a ser completamente diferente entre países con culturas, índices de desarrollo y modelos económicos distintos.

Así mismo, esta investigación pone de manifiesto el papel central de los indicadores de pobreza, precariedad, calidad de la vivienda y urbanismo en el proceso de adaptación a los extremos térmicos. Por ello, los planes de prevención frente a las temperaturas extremas deben abordarse desde una perspectiva integral y transversal y al menor nivel geográfico de actuación posible, implicando activamente iniciativas en política de protección laboral, social y sanitaria a trabajadores y grupos de población vulnerables.

Conclusiones

La población se ha ido adaptando al calor extremo, y si se mantienen las tendencias actuales nos seguiremos adaptando en el horizonte 2050-2100.

Los episodios de frío extremo no se han intensificado en el periodo estudiado, y la población se irá adaptando gradualmente a las bajas temperaturas si las tendencias actuales se mantienen.

La evolución de las temperaturas umbrales sirven como indicador de adaptación.

Las zonas rurales estudiadas ofrecen efecto protector frente a las olas de calor.

La ruralidad también ofrece efecto protector frente a las olas de frío en la población estudiada.

La población es más vulnerable a las olas de frío que a las olas de calor.

En el desarrollo de planes preventivos a escala local y suburbana, se deben incluir intervenciones sobre la calidad de la vivienda, pobreza y entorno urbano.

Referencias

- AEMET, (2022). Avance Climático Nacional de verano de 2022. Agencia Estatal de Meteorología.
- AEMET, (2021). Resumen Anual Climatológico del año 2021 (No. 2021).
- Díaz, J., López-Bueno, J., Linares, C., (2023). "Determinación de los umbrales epidemiológicos de temperatura de definición de ola de calor y de ola de frío basados en la mortalidad diaria poblacional." 16/2023/2287.
- Díaz, J., Sáez, M., Carmona, R., Mirón, I.J., Barceló, M.A., Luna, M.Y., Linares, C., (2019). Mortality attributable to high temperatures over the 2021–2050 and 2051–2100 time horizons in Spain: Adaptation and economic estimate. *Environmental Research* 172, 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.041>
- Eurostat, (2021). Cities (urban audit). spatial units. [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/cities/spatial-units> (accessed 12.17.20).
- Follos, F., Linares, C., Vellón, J.M., López-Bueno, J.A., Luna, M.Y., Sánchez-Martínez, G., Díaz, J., (2020). The evolution of minimum mortality temperatures as an indicator of heat adaptation: The cases of Madrid and Seville (Spain). *Sci.Total Environ.* 747, 141259. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141259>
- ISCI, (2022). Sistema de monitorización de la mortalidad diaria por todas las causas [WWW Document]. URL https://momo.iscii.es/panel_momo/#section-documentaci%C3%B3n (accessed 9.30.22).
- Linares, C., Díaz, J., (2008). Impact of high temperatures on hospital admissions: comparative analysis with previous studies about mortality (Madrid). *The European Journal of Public Health* 18, 317–322. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckm108>
- López-Bueno, J., Díaz, J., Sánchez-Guevara, C., Sánchez-Martínez, G., Franco, M., Gullón, P., Peiró, M.N., Valero, I., Linares, C., (2020a). The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors. *Environmental research* 190, 109993. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109993>
- López-Bueno, J., Linares, C., Sánchez-Guevara, C., Martínez, G., Mirón, I., Núñez-Peiró, M., Valero, I., Díaz, J., (2020b). The effect of cold waves on daily mortality in districts in Madrid considering sociodemographic variables. *Science of the Total Environment* 8.
- López-Bueno, J., Navas-Martín, M., Díaz, J., Mirón, I., Luna, M., Sánchez-Martínez, G., Culqui, D., Linares, C., (2021a). The effect of cold waves on mortality in urban and rural areas of Madrid. *Environ Sci Eur* 33, 72. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00512-z>

- López-Bueno, J., Navas-Martín, M.A., Díaz, J., Mirón, I.J., Luna, M.Y., Sánchez-Martínez, G., Culqui, D., Linares, C., (2021b). Analysis of vulnerability to heat in rural and urban areas in Spain: What factors explain Heat's geographic behavior? *Environmental Research* 112213. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112213>
- López-Bueno, J., Navas-Martín, M., Linares, C., Mirón, I., Luna, M., Sánchez-Martínez, G., Culqui, D., Díaz, J., (2021c). Analysis of the impact of heat waves on daily mortality in urban and rural areas in Madrid. *European Journal of Public Health* 31. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckab164.632>
- López-Bueno, J.A., Díaz, J., Follos, F., Vellón, J.M., Navas, M.A., Culqui, D., Luna, M.Y., Sánchez-Martínez, G., Linares, C., (2021). Evolution of the threshold temperature definition of a heat wave vs. evolution of the minimum mortality temperature: a case study in Spain during the 1983–2018 period. *Environ Sci Eur* 33, 101. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00542-7>
- López-Bueno, J.A., Díaz, J., Navas, M.A., Mirón, I.J., Follos, F., Vellón, J.M., Ascaso, M.S., Luna, M.Y., Martínez, G.S., Linares, C., (2022a). Temporal evolution of threshold temperatures for extremely cold days in Spain. *Science of The Total Environment* 844, 157183. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157183>
- López-Bueno, J.A., Navas-Martín, M.A., Díaz, J., Mirón, I.J., Luna, M.Y., Sánchez-Martínez, G., Culqui, D., Linares, C., (2022b). Population vulnerability to extreme cold days in rural and urban municipalities in ten provinces in Spain. *Science of The Total Environment* 852, 158165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158165>
- MSAN, (2023). Plan nacional de actuaciones preventivas de los efectos del exceso de temperatura sobre la salud.
- Roldán, J, D., E., Gómez, M., Pino, M.R., Esteban, M., (2011). Determinación de zonas isoclimáticas y selección de estaciones meteorológicas representativas en Aragón como base para la estimación del impacto del cambio climático sobre la posible relación entre la mortalidad y temperatura. *Rev. Esp. Salud Publica* 85, 603-610.

Capítulo 4

Addressing Energy Poverty in the European Union: Analysing policies, identifying challenges, and mobilizing local solutions in Portugal

João Pedro Gouveia, Salomé Bessa, Katherine Mahoney, Pedro Palma, Miguel Macias Sequeira

CENSE—Center for Environmental and Sustainability Research, CHANGE - Global Change and Sustainability Institute, NOVA School of Science and Technology, NOVA University Lisbon, Caparica, Portugal

Correo electrónico: jplg@fct.unl.pt

Abstract

Energy poverty (EP) in Europe extends beyond mere accessibility challenges and profoundly impacts society. It is marked by housing inefficiencies, economic constraints, and rising energy prices, which affect health, social structures, and educational attainments, exacerbating thermal discomfort and various health issues. Recognizing the urgency of tackling this issue, the European Commission has provided recommendations on policy and measures, legal frameworks, engagement and communication governance, and indicators to conduct an effective diagnosis. At the same time, the Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) plays a central role, offering expertise and a user-friendly dashboard for data accessibility. The chapter investigates the intricate interplay between climate change, the energy transition, and energy poverty in Southern Europe, focusing on Portugal as a potential pioneer. It provides a comprehensive overview of the region's susceptibility to energy poverty and evaluates current Portuguese policies, shedding light on their efficacy and identifying synergies and trade-offs. Delving into EP mitigation, the chapter examines the cost-effectiveness of renovation measures to enhance building thermal performance and explores energy efficiency scenarios for reducing regional energy poverty. Additionally, it estimates the costs of decarbonizing and electrifying domestic energy consumption, providing insights for policymakers. Emphasizing the critical role of local action, the chapter addresses the limitations of digital approaches and advocates for community-centric strategies. It presents methods for bringing energy support to local communities, encourages collaborative renewable energy sharing, and underscores meaningful engagement with local stakeholders, fostering a bottom-up approach for sustainable, resilient communities. This work contributes to understanding EP challenges and opportunities in the European Union, utilizing Portugal as a case study. By evaluating policies, proposing cost-effective solutions, and advocating for localized strategies, the research aims to inform academic discourse and policy implementation, fostering a more inclusive and sustainable energy future for Southern Europe.

Keywords:

Energy Poverty Research, Competing Agendas, Diagnosis and Indicators, Local Action

Resumen

La pobreza energética (PE) en Europa, que va más allá de los simples desafíos de accesibilidad, impacta profundamente en la sociedad, marcada por ineficiencias habitacionales, limitaciones económicas y aumento de los precios de la energía. Estas adversidades afectan a la salud, las estructuras sociales y los logros educativos, exacerbando el malestar térmico y diversos problemas de salud. Reconociendo la urgencia, la Comisión Europea proporciona recomendaciones e indicadores, aplicación del marco jurídico, medidas, gobernanza, participación y comunicación. Al mismo tiempo, el Centro de Asesoramiento sobre Pobreza Energética (EPAH) desempeña un papel central, ofreciendo experiencia y un panel fácil de usar para la accesibilidad de los datos. El capítulo investiga la intrincada interacción entre el cambio climático, la transición energética y la PE en el sur de Europa, centrándose en Portugal como un pionero potencial. Proporciona una visión global de la susceptibilidad de la región a la pobreza energética y evalúa las políticas portuguesas actuales, arrojando luz sobre su eficacia e identificando sinergias y compensaciones. Profundizando en la mitigación de la PE, el capítulo examina la rentabilidad de las medidas de renovación para mejorar el rendimiento térmico de los edificios y explora escenarios de eficiencia energética para reducir la pobreza energética regional. Además, estima los costos de descarbonizar y electrificar el consumo de energía nacional, proporcionando información a los responsables de la formulación de políticas. Al enfatizar el papel fundamental de la acción local, el capítulo aborda las limitaciones de los enfoques digitales y aboga por estrategias centradas en la comunidad. Además, este capítulo presenta métodos para brindar apoyo energético a las comunidades locales, fomenta el intercambio colaborativo de energía renovable, y subraya un compromiso significativo con las partes interesadas locales, promoviendo un enfoque ascendente para comunidades sostenibles y resilientes. Este trabajo contribuye a comprender los desafíos y oportunidades de la PE en la Unión Europea, utilizando a Portugal como caso de estudio. Al evaluar políticas, proponer soluciones rentables y abogar por estrategias localizadas, la investigación tiene como objetivo hacer llegar el discurso académico y la implementación de políticas, impulsando un futuro energético más inclusivo y sostenible para el sur de Europa.

Introduction

Energy poverty is a complex societal issue representing households' difficulty in obtaining affordable, trustworthy, and sustainable energy services—a problem beyond mere accessibility. Within the European Union (EU) borders, a significant number (between 50 to 125 million) of people struggle with the diverse expressions of EP, demonstrating its widespread nature and urgency (Hasheminasab *et al.*, 2023).

Characterized by inefficiencies in housing infrastructure, economic constraints in low-income households, and escalating energy prices, exacerbated by the aging demographic profile of the European populace (Schleich, 2019), energy poverty unfolds as a complex nexus. Its ramifications extend palpably across health parameters, social structures, and educational attainments within affected households (Ballesteros-Arjona *et al.*, 2022). Thermal discomfort, arising as a corollary, exacerbates the adversities, giving rise to respiratory or cardiac afflictions, compromised mental health, and heightened seasonal mortality (Jessel *et al.*, 2019). Policymakers across multifa-

rious domains encompassing health, energy, social services, and housing increasingly recognize and grapple with the intricate and profound consequences of energy poverty (Manjon *et al.*, 2022).

Energy poverty is, therefore, an issue that impacts the population of all the EU Member States. In October 2023, the European Commission published a new EP recommendation, following the Recommendation (EU) 2020/1563 and the accompanying staff working document, offering guidance on understanding EP and defining significant numbers of affected households (European Commission, 2023). These documents provide a set of 13 EP indicators, allowing Member States to choose those relevant to their context.

Moreover, the Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) is a pivotal European Commission project at the forefront of addressing EP (EPAH, 2022a). EPAH plays a central role in the European landscape, offering comprehensive guidance and expertise to Member States and local communities to combat EP (EPAH, 2021). Collecting accurate data through relevant indicators is essential to identifying the number of individuals affected by EP. Optional modules in European statistics on income, social inclusion, and living conditions offer valuable insights into the number of households affected by energy poverty in national or regional contexts.

EPAH's rigorous research and analysis, covering over 25 EP indicators organized by multiple areas, have contributed to enhancing the national and regional diagnosis, encompassing EU Member States and an additional 13 countries (Gouveia *et al.*, 2022; Gouveia *et al.*, 2023a). This wealth of data is accessible through a user-friendly online dashboard, promoting awareness and knowledge among diverse stakeholders while aiding policy development. Additionally, EPAH's scientific review of regional EP indicators and data collection methods provides invaluable insights for local governments seeking to conduct EP diagnoses in their respective areas.

EPAH's work extends far beyond data collection; it encompasses driving knowledge (EPAH, 2023a), fostering sustainable energy practices (Palma and Gouveia, 2022), and actively contributing to reducing EP by empowering communities (EPAH, 2023b), championing social justice, and promoting environmental protection.

EP has affected European nations at different levels of intensity. It has been a significant concern in Portugal, particularly in the aftermath of the economic crisis that struck Europe in 2008. As a result of this crisis, southern and eastern European countries experienced a rapid increase in EP, and Portugal was no exception (Matos *et al.*, 2022). In 2020, Portugal ranked fourth in the European Union for the percentage of citizens reporting their inability to adequately heat their homes during the winter, with 17.5% of the population affected (Gabriel *et al.*, 2023). Moreover, it held the unenviable position of being the second-highest in the EU for the percentage of its population residing in homes with issues such as leaking roofs, damp walls, and rot, standing at 25.2% (EPAH, 2023c).

Looking for solutions, the IEA (2023) affirms that all technologies needed to achieve deep emissions cuts to 2030 are available. It ascertains that a net zero pathway requires the active participation of citizens, with more than half of emissions reductions up to 2050 directly or indirectly linked to individual choices and behavior changes. Furthermore, the European Commission (2019) also recognizes the role of citizens in the energy transition, for instance, estimating that by 2050, around half of Europeans will be able to produce their own renewable energy.

However, the systematic failure of energy policies and interventions to effectively engage with specific population groups has led to the emergence of the hard-to-reach energy users concept, defined by Rotmann *et al.* (2020) as “any energy user from the residential & non-residential sectors, who uses any type of energy or fuel, and who is typically either hard-to-reach physically, underserved, or hard-to-engage or motivate in behavior change, energy efficiency and demand response interventions that are intended to serve our mutual needs”. The same authors review five major groups of hard-to-reach energy users: vulnerable households, high-income households, tenants and landlords, small and medium enterprises, and commercial subsectors. Due to widespread and persistent barriers, these are very significant segments of the population that remain hard to reach with traditional one-size-fits-all energy policies, financing schemes, and business models (Ambrose *et al.*, 2019).

In this chapter, we will look into competing policy agendas of climate change, EP, and the energy transition on the path to decarbonization, assessing the costs and challenges of EP mitigation while providing, in the final section, examples of local action and citizen support while mobilizing local initiatives in Portugal.

The path to decarbonization in Europe-Competing Agendas?

Energy poverty is linked to multiple policy domains (Stojilovska *et al.*, 2022), including health, education (Mould *et al.*, 2017), and housing tenure (Großmann, 2019). Despite this, EP is increasingly framed within decarbonization policy due to the apparent connections between the condition and energy consumption in buildings (Webber *et al.*, 2015). This approach is traceable from the period following the 2008 recession in the European context. Also, it represents an effort on the part of the EU to address inequalities associated with the energy transition (Vondung & Thema, 2019). Framing EP in the broader context of decarbonization gained ever more credibility in the post-COVID context, where the opportunity to recover global economies via the development of renewable energy infrastructure has been emphasized (Stern *et al.*, 2021). The war in Ukraine has further spurred motivations to reduce international fossil fuel dependencies. Additionally, recent extreme weather events such as summer heat waves observed in Europe (Kew *et al.*, 2019) demonstrate the impact and urgency of the climate crisis. In this sense, European policymakers are essentially challenged to address three policy agendas in tandem: those of EP, climate change (CC), and the energy transition (ET).

In the face of these various pressures, recent years have seen a suite of European policy packages addressing these interrelated agendas. Of particular note is the Clean Energy for All Europeans package, adopted in 2019 and including targets for renewable energy (32% of the EU's energy mix by 2030), an obligation for Member States to implement national roadmaps for the decarbonization of buildings by 2050 and amendments to the electricity directive requiring Member States to monitor and report on the number of households in EP every two years (EU, 2019), (Vondung & Thema, 2019). Other essential policy initiatives include the European Green Deal presented by the European Commission in 2021, setting out a new European growth strategy, including reducing greenhouse gas emissions by 55% by 2030 against a 1990 base year. The RePower EU plan is also relevant, focused on secure and sustainable energy at affordable prices for all Europeans (EC, 2023a). The Renovation Wave Strategy is another key policy, highlighting targets to double annual renovation rates by 2030 (EC, 2023b). Crucially, these strategies view the mitigation of EP as synergistic with emissions reduction and energy transition targets.

Thus far, however, the evidence has shown a somewhat more mixed picture regarding the ability of these policy tools to simultaneously address multiple aims, suggesting that what is beneficial for one policy agenda may result in trade-offs for another (McCoy & Kotsch, 2020; Sherriff *et al.*, 2022). Examples include so-called low-carbon gentrification, where efforts to improve the energy efficiency of residential areas have resulted in an inability to afford increased rental costs (Großmann, 2019), (Bouzarovski *et al.*, 2018). In the UK, post-renovation energy savings have been higher than predicted in middle- and higher-income homes and consistent with predictions in lower-income homes, where anticipated rebound effects were below the expected levels (Webber *et al.*, 2015). The opportunities offered by the energy transition have resulted in new jobs, regional development, and welfare improvements in areas that suffered high unemployment rates (Osti, 2018). In short, implementing energy transitions can be directly or indirectly linked to EP, for example, directly through retrofit activities or indirectly through income or other recognized drivers, and have different effects on different goals. These effects can adversely impact disadvantaged groups (Großmann, 2019); thus, it is essential to understand who is affected by implementing decarbonization policies.

Research in this area finds a greater vulnerability to EP in the Southern and Eastern European States (OpenEXP, 2019; Omic *et al.*, 2019) or the so-called “energy poverty periphery” (Bouzarovski *et al.*, 2017). Specifically, Southern and Eastern European regions share several characteristics leading to this increased vulnerability; these include poor building quality, high energy prices, low incomes, the underconsumption of energy, and low rates of climatization equipment ownership (Antepara *et al.*, 2020) (Robić, 2016). Despite these similarities, significant political and historical divergences influence the current situation between these two cases; therefore, we focus our exploration on the Southern European country – Portugal.

Southern Europe faces several threats due to climate change, which have already begun to manifest, for example, the increased likelihood of wildfires in the last century (IPCC, 2021). Future projections include increased droughts (IPCC, 2021) and heat waves (Parente *et al.*, 2018). Climate change impacts in European cities may be exacerbated due to the “urban heat island” effect (Oliveira *et al.*, 2022). In the immediate future, heat waves in urban areas of the Mediterranean may increase mortality by 21.8% (Smid *et al.*, 2019).

The above illustrates the logic of addressing the political agendas of climate change, the energy transition, and EP in tandem. It demonstrates the need within Southern Europe for solutions that address the built environment, thermal comfort, and, correspondingly, EP. The issue of increased mortality adds a deeper moral obligation on the part of policymakers, particularly as Southern European countries experience comparatively short and mild winters, yet both (Healy, 2003) and (Fowler *et al.*, 2014) demonstrate an elevated rate of Excess Winter Deaths (EWDs) in these regions, Fowler’s (2014) more recent analysis shows that Cyprus, Malta, Portugal, and Spain have an EWD rate above the EU average.

A trend of resignation to poor thermal comfort conditions has been observed in Southern European regions, with vulnerable consumers exhibiting limited capacity to improve their circumstances (Horta *et al.*, 2019). This is attested in the work of Santamouris *et al.* (2014), who show a correlation between higher average annual incomes and increased total energy consumption for heating in Athens. Omic *et al.* (2019) highlight the severity of EP in Southern European regions and demonstrate that high rates of the condition correlate strongly with increased rates of income poverty, food poverty, and poor health.

The EU addresses these contextual issues in customized energy transition implementation (EC, 2018). Each member state is responsible for implementing its own transition, implying a series of individual transitions. With considerable renewable resource (mainly solar) capacity installation underway and planned, transitions in Southern Europe offer significant opportunities, including economic development and skilled job creation (Sareen, 2020). Renewables also present the opportunity to decouple economic growth and increased CO₂ emissions, which policymakers have long struggled to overcome (Omri *et al.*, 2021).

Despite the promise that decarbonization pathways hold for Southern Europe, some challenges remain in jointly delivering on the goals of climate change, energy transitions, and EP. For instance, in Greece, expenditure on technical equipment pushed up electricity end-use costs, diminishing public appetite for the transition to solar energy (Nikas *et al.*, 2020). A crucial emergent concern is that of land use and tensions between different territories, which has been observed in Spain because of regional variances in the viability of spaces for the development of community energy projects (Standal *et al.*, 2023). In Italy, until 2020, barriers at the legal level impeded progress with the development of community energy initiatives (Cunha *et al.*, 2021). In

Portugal, gaps in the regional development of transition-related opportunities may deepen existing economic divisions between the urban hubs of Lisbon and Porto and the rural regions of the country (Mahoney *et al.*, 2022).

Portugal- A Southern European trailblazer?

Like its Southern European neighbors, Portugal has an entrenched struggle with EP, with both the summer and the winter seasons being problematic (Gouveia *et al.*, 2019). Low incomes and a highly inefficient building stock (IEA, 2021) also contribute to low rates of climatization equipment ownership and a worrying trend of under-consumption (Gouveia *et al.*, 2019).

Portugal was also a weak engager with the Kyoto Protocol, taking the view that renewable energy was a burden for taxpayers (Carvalho *et al.*, 2013; Sareen and Wolf, 2021). In the post-Kyoto era, however, Portugal has shown a marked turnaround in its approach to decarbonization through the implementation of the energy transition, where between 2010 and 2021, installed power for electricity production increased by 3.5 GW, mainly through the production from renewable resources (DGEG, 2023a). Portugal also outperforms its Southern European counterparts both in the share of energy from renewable resources (% of final energy consumption), ranking 7th in Europe in 2021, and in the percentage of energy from renewable sources in gross electricity consumption, ranking 4th in Europe in 2021 (EUROSTAT, 2023) and on both occasions outranking countries with similar socio-economic characteristics such as Greece, Spain, and Italy. Portugal has benefited from the ET through increased employment opportunities (Deloitte, 2019) and greater energy independence. Critically, as a country that has faced prolonged economic challenges, Portugal has cast its lot on the opportunities the energy transition can bring.

When contrasting progress in the domains of climate change mitigation through the energy transition with progress in energy poverty mitigation, however, it is clear that Portugal faces several challenges in delivering a just energy transition that leaves no one behind.

Synergies and trade-offs in current Portuguese policies

Like many EU member states, Portugal's engagement in EP has been driven by the previously described evolutions in European policy, with a pivotal policy moment being the creation of social electricity and gas tariffs to protect vulnerable consumers in 2016; this followed protections for such consumers stipulated in the Third Energy Package (EU, 2014). These first steps towards addressing the condition in Portugal approached the issue of high energy costs but principally from the perspective of this being a social rather than an energy system issue.

More recently and again in line with the evolution of these themes at the EU level, tighter links have been made between mitigating EP and general improvements to the building stock and energy supply to reduce emissions and improve efficiency. Key policies which link the move to decarbonization with tackling EP are:

- The Carbon Neutrality Roadmap 2050 - *Roteiro Para a Neutralidade Carbónica 2050* (Portuguese Republic, 2019b).
- National Energy & Climate Action Plan 2030 - *Plano Nacional Energia e Clima 2030* (Portuguese Republic, 2019^a)
- The Long-Term Strategy for the Renovation of Buildings - *Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios de Portugal* (Portuguese Republic, 2021).
- The draft Energy Poverty Strategy - *Estratégia Nacional de Longo Prazo para o Combate à Pobreza Energética 2021-2050* (Portuguese Republic, 2023))
- The Portuguese COVID Recovery and Resilience Plan - *Plano de Recuperação e Resiliência (PRR)*
 - Two funding schemes run under the PRR:
 - More Sustainable Buildings II - *Edifícios Mais Sustentáveis II*
 - Efficiency Voucher - *Vale Eficiência*

Table 1. Portuguese policy agenda synergies and trade-offs between CC, ET, and EP agendas.

Policy agenda	Key synergies due to integrated agendas	Key trade-offs due to integrated agendas
Climate change	• Reduced GHG emissions resulting from building efficiency improvements • Uptake of renewables reduces GHG emissions.	• Risks of “rebound” effect • Materials for buildings and renewables not sustainably and/or ethically sourced
Energy transition	• Associated economic benefits impacts drivers of EP e.g., income • Renewables offer reduced market volatility & better price stability • Portugal has significant renewable resources and thus renewables present a good return on investment	• Opportunities & impacts not equally distributed, e.g., employment, extraction of minerals • Reliance on citizen participation challenged by literacy, education & conflicting media information (sometimes driven by perceived inequalities)
Energy poverty	• Building efficiency targets reduce EP • ET drives alternatives (e.g., energy communities) to large energy market incumbent model	• Targeted schemes & alternatives are not equally accessible to all • Energy consumption may need to increase where existing consumption is very low

Source: Own elaboration.

Table 1 presents an overview of these synergies and trade-offs between the different agendas in Portugal. These are the combined results of a policy analysis and subsequent qualitative interview process exploring the case (Mahoney *et al.*, 2022; Mahoney *et al.*, 2023).

Overall, the suite of policies addressing these agendas shows a strong recognition of the EP situation in Portugal. Significant co-benefits across these agendas include the beneficial impacts of building retrofit activities on reducing GHG emissions and creating alternative energy system models that are more just and in which citizens are more active. The ready availability of renewable resources in Portugal (mainly solar) deepens the synergy between alternative energy models and the alleviation of EP. Key trade-offs include a lack of holistic vision for building retrofit chains, where incorporating environmentally friendly materials is not common practice (Mahoney *et al.*, 2023). Similarly, materials required for renewable energy resources generally imply trade-offs at the extraction site, including soil pollution and adverse effects on local populations (UNCTAD, 2020). Another important trade-off was the lack of equal access to transition benefits, where the financial capacity to invest in retrofit activities presents a barrier, as do literacy and education levels. Finally, there is uncertainty about whether consumers need to increase energy consumption to increase thermal comfort in Portugal, with corresponding consequences for the climate change agenda (Gouveia *et al.*, 2019).

Cross-Country Scenario Analysis of Energy Efficiency, Decarbonization, and Energy Poverty Mitigation Solutions

Energy inefficiency of homes is one of the leading causes of EP, resulting in unnecessarily high energy needs for space heating and cooling and subsequent higher energy expenditures. Chronic lack of thermal comfort is a significant determinant of health and social inequality that could be alleviated through energy efficiency measures (Boemi *et al.*, 2019). Dobbins *et al.* (2019) also underline the need for designing and implementing integrated EP policies and strategies that propose mitigating and structural measures, the latter focusing on energy efficiency improvement of dwellings. These measures can also significantly reduce greenhouse gas emissions (GHG) of the building stock (EEA, 2023).

The residential building stock in Portugal is old and has low energy performance and efficiency. About 65.5% of residential buildings were constructed before 1990 (INE, 2021), which marks the implementation of the first Portuguese energy performance regulation for residential buildings. This aspect is an important determinant of their energy performance and efficiency, as about 68% of all the energy-certified residential buildings (about 1.43 million) have an energy performance rating equal to or lower than C, below the standard for new buildings (ADENE, 2021, 2023). For the five years before 2019, the average deep renovation rate was approximately 0.01 percent per year (INE, 2019), significantly lower than the EU average renovation rate

of 1% (European Commission, 2020b) and a target of 3% (BPIE, 2020). The low energy performance rates are also a result of inefficient heating and cooling equipment - about 26.4 percent of improvement measures proposed in energy performance certificates pertain to HVAC systems replacement (DGEG, 2021). Biomass is the most common energy carrier for indoor space heating (INE/DGEG, 2021). Decentralized, low-efficiency heating systems such as fireplaces and electric oil heaters are still widespread nationwide (INE/DGEG, 2021). There is still a low ownership rate of space cooling systems, about 33% (INE/DGEG, 2021), compared to southern European countries with climate similarities (Castaño-Rosa *et al.*, 2021). Space cooling is still mainly provided through ventilation equipment such as cooling fans. Differences across the country related to energy infrastructure and fuel availability, as well as cultural aspects (Horta *et al.*, 2019), result in substantial variation in the ownership and use of heating and cooling equipment across the territory, particularly between rural and urban regions, also linked to distinct consumption patterns and cases of underconsumption, and problems of indoor air quality.

Increasing energy efficiency is, therefore, an urgent need and currently a policy priority, as evidenced by several policies and strategies at the national level, such as the ones mentioned in the previous section. The same national policies highlight the concurrent goals of swiftly reducing EP levels amongst the population while also pushing for the fast decarbonization of energy consumption in the domestic sector. Promoting energy efficiency in household energy consumption can be achieved via active or passive energy efficiency measures. Passive measures are related to the buildings' physical envelope and properties, involving the design, construction, and renovation orientated towards reducing energy demand. Examples are the replacement of windows, natural ventilation, or the application of insulation.

On the other hand, active measures are related to using systems and technology that control and optimize energy consumption. Examples include replacing less efficient equipment with higher efficiency ones, such as LED for lighting or heat pumps for space heating and cooling. Installing programmable thermostats, smart building management systems, and other energy-efficient appliances are additional measures that can improve a home's energy efficiency.

To assess the role of energy efficiency increases in space heating and cooling as a viable and impactful solution towards the energy transition and EP mitigation in Portugal, two different analyses were conducted for the Portuguese residential building stock, focusing on these two types of energy efficiency measures.

Cost-effectiveness of Renovation Measures for Improving Thermal Performance of the Building Stock

The first study (Palma *et al.*, 2022a) is a cross-country, regionally specific cost-effectiveness analysis of passive energy renovation measures of the building envelope. It explores the impact of renovating the building stock to upgrade its energy perfor-

mance to the nearly Zero Energy Buildings (nZEB) level, setting out to identify the most cost-effective renovation measures, together and in a bundle, and the dwelling archetypes and regions with the highest potential for space heating and cooling energy needs reduction at the lowest possible cost. The methodological framework has five different steps. Firstly, the dwelling stock was typified in different regionally representative dwelling archetypes according to the type of building (house or apartment building) and construction period, and construction and energy performance parameters like thermal resistance, floor areas, solar factor, height, and thermal inertia. Using raw data from approximately 525 thousand Portuguese dwelling stock energy performance certificates, 264 typologies were established, 11 per 24 NUTS3 regions.

In the next step, a market survey of renovation measures with information regarding materials' physical and thermal properties (thickness and conductivity) and the total investment costs was conducted, and a corresponding database was created. Measures were collected for the roof, external walls, and windows. The thermal resistance of each insulation solution was calculated from the material properties collected from Santos & Matias (2006), and the investment costs, including material and estimated person-hours for implementation, without taxes, were collected from a market-based budget generation tool (CYPE, 2013).

Next, three different building renovation scenarios were considered in the study: 1) Scenario A, considering the best possible measures in the market regarding their thermal performance, which also meant the highest costs; 2) Scenario B, selecting the lowest cost renovation measures that comply with the thermal performance requirements of the current national residential building energy performance regulation (Ordinance no. 349-B/2013). This scenario considers the internal insulation of

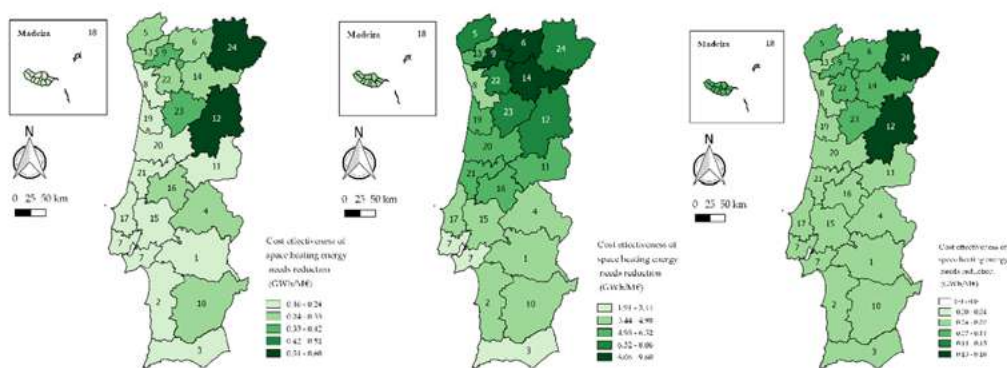


Figure 1. Wall, roof and window (left, centre, and right) renovation cost-effectiveness for space heating energy needs reduction in Scenario B (Adapted from Palma *et al.*, 2022a).

walls for the dwelling archetypes pre-1960, assuming that these are listed buildings where external insulation is not allowed by regulations. In 3) Scenario C, measures are the same as Scenario B except for the walls, as external insulation is tested for all archetypes. In the fourth step, the space heating and cooling energy needs were

calculated for each dwelling archetype according to the physical method and requirements for nearly zero-energy buildings defined in the current National Energy Performance Regulation. These energy needs represent the useful energy requirement to maintain a comfortable indoor temperature in the heating season (18°C) and cooling season (25°C), independent of the equipment used. The energy needs were computed before and after the renovation for each scenario to estimate the impact of the renovation. The investment cost for each building element and for all the dwelling area of each archetype was estimated. Finally, the cost-effectiveness was computed as the energy needs reduction achieved with 1M€ investment per unit of area (m²) of a particular archetype dwelling.

Findings show that renovating the entire dwelling stock requires an investment cost ranging from €71,700 million in Scenario B to €99,600 million in Scenario A. The latter is the most impactful scenario for total energy needs reduction, resulting in an 86.1% reduction in space heating needs and a 41.4% decrease in space cooling energy needs. Scenario A is also the most cost-effective for space cooling energy needs reduction. However, Scenario B is the most cost-effective for space heating energy needs reduction, with 0.32 GWh energy needs reduced per M€. Wall renovation is the most effective in lowering space heating energy needs in Scenario A (43.3%). Notably, roof insulation is the most cost-effective measure in every scenario, reaching its highest value of 3.4 GWh/M€ for space heating energy needs reduction and 0.8 GWh/M€ for space cooling for Scenarios B and C. The renovation cost-effectiveness for space heating energy needs reduction is Scenario B for walls, roof, and windows is displayed in Figure 1.

Considering dwelling archetypes, the highest cost-effectiveness results of the package of interventions for both space heating and cooling are observed for the older house archetypes, houses pre-1919, and in the period between 1919 and 1945. Alto Tâmega, Beiras e Serra da Estrela, and Terras de Trás-os-Montes in the north inland are the regions where renovation measures have higher cost-effectiveness for space heating needs reduction, whereas, for space cooling, it is the south inland where higher values are observed, namely in the regions of Alentejo Central, Alto Alentejo, and Baixo Alentejo.

The study shows the considerable potential of renovation measures to significantly reduce the energy needs of the dwelling stock, increase indoor thermal comfort, and potentially reduce vulnerability to energy poverty in Portuguese households. The relevant information provided by this study regarding the impact on energy needs reductions, costs, and estimated cost-effectiveness of renovation measures per region, dwelling archetype, and type of measures can be useful for regional governments to improve the efficiency of funding and effectiveness of their actions and schemes. In the long run, it can contribute to boosting renovation rates across the country.

Energy Efficiency Improvement Scenarios for Reducing Regional Energy Poverty Levels

The second study (Palma *et al.*, 2022b) does not focus on the economic perspective; rather, it aims to draw a tangible connection between practical and viable energy efficiency solutions and reducing EP levels and carbon emissions at the regional spatial scale in the Portuguese mainland territory. It focuses on active energy efficiency measures, namely replacing space heating and cooling equipment. It assesses the impact of comprehensive space heating and cooling equipment replacement on regional EP levels while controlling for other variables and the potential variation in CO₂ emissions related to energy consumption levels in homes. The Energy Poverty Vulnerability Index (EPVI) (Gouveia *et al.*, 2019) is used to compute regional EP vulnerability in the heating and cooling season for all 308 Portuguese municipalities for the whole dwelling stock. The EPVI ranges from 1 (less vulnerability) to 20 (highest vulnerability), and it is the average of the energy gap sub-index and the symmetrical value of the adaptive capacity sub-index. The energy gap sub-index is the difference between the theoretical final energy consumption for thermal comfort conditions and the actual final energy consumption, as presented in Palma *et al.* (2019).

The theoretical consumption is calculated following an identical methodology for the computation of the energy needs calculation in Palma *et al.* (2022a), and then multiplying the number of occupied dwelling stock per typology and the ownership percentages and efficiencies of the different space heating and cooling systems. The final energy consumption for space heating and cooling is estimated from municipal energy consumption data per energy carrier (DGEG, 2022) and national and regional shares of energy consumption for space heating and cooling. The adaptive capacity sub-index is meant to represent the ability of the population to implement measures to cope with thermal discomfort. Socioeconomic indicators such as median income, tenancy, unemployment rate, population share with a university degree, population age, and building conservation state are weighted according to feedback from national experts in this field. Its weighted sum is the value of the sub-index.

The variation in the theoretical final energy consumption and subsequently on the EPVI is assessed in two energy efficiency improvement scenarios: Scenario A, we maintained the ownership rates for both heating and cooling equipment, but increasing efficiencies were to the level required by the residential buildings' energy performance regulation, which presupposes a replacement of equipment for a more efficient but similar type; and Scenario B, built according to the "Yellow Jersey" 2050 pathway set in the Portuguese Carbon Neutrality Roadmap. This pathway proposes a socioeconomic development with structural changes in the production chains, circular economy models' integration, and growth of medium cities, and it is consistent with the goal of carbon neutrality. In this pathway, the energy system was optimized for carbon neutrality, unveiling the necessary national split of HVAC equipment ownership in the domestic sector to achieve the goal. Since this study is regionally specific, regional ownerships were estimated from the national ownerships proportionally

from the current situation scenario to reach the established national ownerships for 2050, and efficiencies were improved to the level of the regulation as well. Finally, the carbon dioxide emissions resulting from the actual final energy consumption and the theoretical final energy consumption were estimated using default emissions factors from the IPCC's Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories for Stationary combustion in the residential and agriculture/forestry/fishing/fishing farm categories (IPCC, 2006), for LPG (butane and propane), natural gas, and diesel, and the Portuguese energy supplier Energias de Portugal S.A (EDP, 2021) for electricity—the difference between emissions before and after the energy efficiency measures was computed and analyzed.

The results show that the improvement in energy efficiency of space heating and cooling equipment in the Portuguese dwellings contributes to reducing EP vulnerability levels for both scenarios in different levels of magnitude. In Scenario A, EPVI municipal levels are reduced by 17.8% percent and 1.0% for space heating and cooling needs, and 47.8% and 26.3% in Scenario B. Higher reductions are found in winter EP due to the widespread lower energy-efficient equipment, mainly fireplaces but also biomass stoves and diesel boilers. In the regions of the inland center and north of the country, higher municipal EPVI level reductions are observed in both scenarios, around 28% for Scenario A. In Scenario B, the measures are very impactful, reducing EPVI levels to a value lower than five in about 59 percent (182) of all 308 municipalities. The change in EPVI regarding space heating in the different scenarios can be observed in Figure 2. As for space cooling, energy consumption is lower due to lower ownership of systems, but the equipment is more efficient. Space cooling EPVI reductions are lower than for space heating as the equipment stock has efficiency levels similar to regulation standards. In Scenario A, the highest decreases are found in Lisbon and Porto regions (-2% and -3%) due to the greater size of the dwelling stock, as the same ownership rate was considered for every municipality in this case. In Scenario B, where systems are changed for different and more efficient ones, average municipal EPVI reductions are more substantial, also in the urban centers of Lisbon and Porto (-36% and -34%), where actual consumption levels are more significant. These findings, while positive from an energy efficiency point of view, also tie into themes of how benefits are distributed across Portugal, where Lisbon and Porto are typically more affluent than regional inland zones and, in this scenario, are more likely to benefit from the cost reductions associated with efficiency gains.

The current energy gap between theoretical energy consumption for thermal comfort and actual energy consumption, where real energy consumption is lower, dictates that an increase in emissions would be necessary for thermal comfort in Portuguese homes in the current situation regarding space heating and cooling technology ownership. The gap is not significantly reduced in Scenario A, 1.3% and 0.6% for heating and cooling or 195 kilotons and 43 kilotons of CO₂, respectively. In Scenario B, the gap is offset, and emissions would drop below current emissions by 4 kilotons of CO₂. However, for space heating, the gap would be reduced by 16.5%, which means emissions would still need to rise to guarantee energy sufficiency in Portuguese homes.

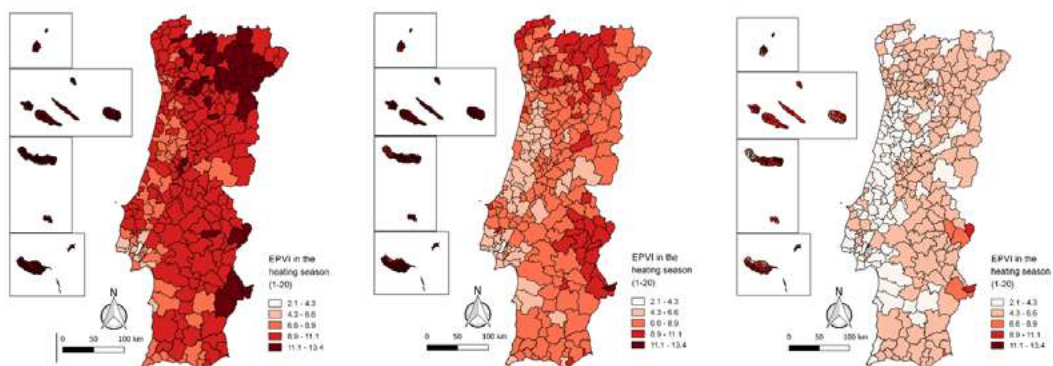


Figure 2. Heating season EPVI in the Current Situation (Left), Scenario A (center), and Scenario B (Right) Adapted from Palma *et al.* (2022a).

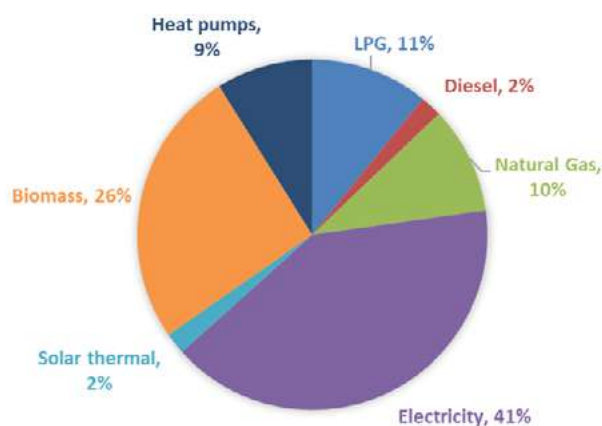


Figure 3. Final energy consumption in the domestic sector in 2021 per energy carrier (Adapted from DGE, 2023b).

Thus, in response to uncertainties raised in the preceding section regarding the need for increased consumption, these results indicate that some increases will be required for EP mitigation in the Portuguese case.

This study links three vital European policy topics: EP, decarbonization, and energy efficiency. Its findings can also be useful for national and regional policymakers to design more effective policies. It provides insight into the different impacts of active energy efficiency measures and technology replacement packages toward promoting a fair energy transition. It highlights the priority regions that should be targeted first. Active measures are part of the solution but should always be integrated within a strategy that prioritizes passive energy efficiency, as shown in Palma *et al.* (2022a), to be crucial to achieving these goals as a systemic and more lasting solution.

Estimating the Costs of Decarbonizing and Electrifying Energy Consumption in the Domestic Sector

To broaden the analysis to other energy uses within households, the third study (Palma *et al.*, 2023) aims to estimate the necessary costs for fully decarbonizing energy use in the domestic sector in Portugal via renewable energy integration and electrification of energy consumption. The decarbonization and electrification of buildings is a political objective reiterated in several energy and climate policies. However, a long road remains to be crossed, as fossil fuels and biomass still represented 23% and 39% of consumption in 2021 (DGEG, 2023b), as displayed in Figure 3.

This study conducts a quantitative economic analysis of equipment replacement scenarios, considering the equipment replacement for space heating and cooling, domestic water heating, cooking equipment, and lighting. Four challenges are set: 1) Eliminate fossil fuel energy consumption; 2) Reduce biomass consumption; 3) Increase energy consumption from renewable energy sources; and 4) Increase energy efficiency of the house energy equipment. This analysis is complemented by qualitative auscultation of market players on public behavior, technological availability, and potential future equipment stock evolution. Current challenges and barriers are identified, and possible technical solutions and responses to the goal of decarbonizing energy consumption of Portuguese households are analyzed, minding the population characteristics and needs, for a just and inclusive transition.

A significant estimated investment is required, ranging from 26,000 to 28,000 million euros. To stop fossil fuel energy consumption would require the highest amount of investment, between 12,239 M€ - 14,239 M€, mainly to replace all gas and diesel boilers and heaters with air-to-air heat pumps, multifunction heat pumps, solar thermal panels, combos of heat pumps with photovoltaic panels, hybrid high-efficiency water heaters. Investment is exceptionally high for domestic hot water production, 8,842 M€ - 10,329 M€, followed by space heating, requiring an investment of 2,462 M€. The replacement of kitchen appliances such as gas stoves was also considered, entailing an investment of 935 M€.

Reducing biomass use also requires considerable investment, especially for space heating, as fireplaces and other biomass equipment are still commonly used. This is a sensitive issue because, on the one hand, biomass equipment used in Portugal is often inefficient and, together with poor ventilation, results in severe deterioration of indoor air quality, with significant adverse effects on the health of the occupants. On the other hand, a strong cultural and community component is associated with this fuel's use. Moreover, many families living in rural areas have easy and cheap (or even free) access to wood, contributing to potentially mitigating energy poverty situations. It is estimated that between 6,360 M€ - 6,403 M€ is necessary to replace part of the biomass stoves and fireplaces stock for space heating while replacing them with more efficient biomass alternatives for the most vulnerable populations (such as the elderly) living in rural areas. The investment for domestic hot water production is lower (between 431 M€ - 523 M€) because the stock of biomass boilers

is also smaller. It is even lower than kitchen equipment, as a considerable part of the population still uses biomass stoves. Therefore, 728 M€ - 871 M€ is still needed to reduce biomass use in Portuguese kitchens. Biomass use is a good example of why measure selection should not solely be based on emission reduction or cost-benefit indicators. Still, it analyzes the different intersectional aspects and nuances necessary to consider if a just transition can be achieved. The complexities around biomass use are highlighted and discussed in the works of Horta *et al.* (2019) and Stojilovska *et al.* (2023). Lastly, energy efficiency improvement requires a substantial investment to replace older electric equipment with higher-efficiency heat pumps, electrical heaters, or solar thermal systems. Investment needed is estimated at 4,120 M€ for space heating and 2,267 M€ for domestic hot water. The available public funds for the following years (300M until 2025) fall very short of the estimated necessary investment for the renovation of the building stock presented in Palma *et al.* (2022a), as well as for the decarbonization and electrification of the consumption estimated and discussed in this study. It should be mentioned that the investment in the building stock envelope renovation would most likely reduce the need for active energy efficiency, decarbonization, and consumption electrification measures investment as energy demand would be reduced.

Nevertheless, additional funding would still need to be deployed if these goals are to be met. As for the market side, players point to the complex challenge of achieving these targets. They argue that energy transition targets are too demanding considering the current equipment stock, lack of qualified workforce, need for building adaptation, and heavy investment cost for families, especially those in energy poverty who are not likely to invest. There is a significant potential for a strategy that pushes for a diversified set of measures that synergistically contribute to achieving a just energy transition and mitigating climate change. Still, a tough road lies ahead, with challenging barriers to be overcome.

Local action for just energy transitions and energy poverty mitigation

Acknowledging the challenges of bridging the gap between national level policies and on the ground action and projects and measures implementation, as part of the IEA UsersTCP Task on Hard-to-Reach Energy Users, various authors (e.g., Rotmann, 2021; Sequeira *et al.*, 2021) explored the hard-to-reach energy users' concept in eight developed nations spanning three continents and analyzed nineteen case-studies that (explicitly or implicitly) identified and engaged with hard-to-reach groups to foster their involvement in the energy transition. Several other authors (e.g., Kelly and Pollitt, 2011; Mundaca *et al.*, 2023) have also highlighted the importance of local-scale action to catalyze just energy transitions and eradicate energy poverty, enabling targeted and tailored interventions to engage citizens for the adoption of renewable energy and the improvement of energy efficiency. Herein, we explore three empirical case studies of pilot projects in Portugal to foster just energy transitions.

The shortcomings of digital approaches

A promising solution to engage citizens is deploying one-stop shops that deliver tailored technical advice and financing solutions and accompany households throughout their energy-related projects (European Commission, 2020). One-stop shops can be virtual or physical, present diverse business models, and provide various services depending on the local context, market maturity, available resources, starting point, and target audience (Boza-Kiss and Bertoldi, 2018). Nevertheless, this model is still rare in most European countries.

In this context, Sequeira and Gouveia (2022) mapped the digital one-stop-shop development process to address critical barriers to energy renovation in Portugal. This case study followed a five-step approach comprising stakeholder mapping, expert interviews, customer journey, design of the digital one-stop-shop for building renovation, and market consultation survey. The key output was a virtual platform to support residential buildings' energy renovation by informing on technical measures, funding schemes, and regulations (Figure 4).



Figure 4. The Green Menu digital one-stop-shop (CENSE FCT-NOVA & De Groene Grachten, 2020).

Although digital one-stop shops can close information gaps, activate citizens, and address some barriers to building renovation, this approach caters mainly to homeowners who are already capable and motivated (Sequeira and Gouveia, 2022). Indeed, although useful for providing information in a centralized way, the online format seems largely insufficient for a large segment of hard-to-reach and energy-poor households that do not have the resources, knowledge, and motivation to kick-start a renovation process.

Bringing energy support to the local community's doorsteps

Engaging larger audiences in energy transitions, particularly energy-poor and hard-to-reach households, requires going beyond the production of digital information to the provision of targeted and tailored local-scale energy support (Sequeira and Gouveia, 2022). To address this need, the Calouste Gulbenkian Foundation (2022) brought together a multidisciplinary consortium to develop an innovative physical energy efficiency one-stop shop pilot project deployed in three municipalities of the Setúbal region in Portugal. Located in a renovated maritime shipping container, this mobile one-stop shop provides energy-related support to citizens, including energy efficiency advice, energy bill optimization, counseling for applications to energy efficiency public funding schemes, and free home energy audits (Figure 5).



Figure 5. The Transition Point mobile one-stop shop (Calouste Gulbenkian Foundation, 2022).

The key impacts and insights from the project were explored in detail by Gouveia *et al.* (2023), leveraging future replication in other contexts. These authors find that the piloted approach can successfully deliver face-to-face energy-related support to citizens, especially if the one-stop shop is in a suitable location that is highly visible and used by the local community. Nevertheless, even well-designed local-scale energy support, if not targeted to specific vulnerable groups, may struggle to significantly mitigate energy poverty while leaving behind those most in need.

To overcome this challenge, Gouveia *et al.* (2023b) suggest that one-stop shops should be highly proactive in their approach to citizens and directly engage with energy-poor and hard-to-reach households. Furthermore, the same authors argue that one-stop shops should seek to expand community-level impacts by strengthening communication, engagement, and cooperation with citizens and local organizations and to deepen support for vulnerable families by working closely with other social services and tailoring counseling and financing to the needs of hard-to-reach and energy-poor households. Ultimately, an energy-efficiency one-stop shop needs long-term commitment from local governments and other stakeholders to equip it with the needed resources to effectively engage citizens in a just energy transition at the regional scale (Gouveia *et al.*, 2023b).

Working with the local community for renewable energy sharing

Energy efficiency one-stop shops are a promising solution to deliver information and support to citizens and actively promote their engagement in the energy transition. A complementary approach may be deploying renewable energy communities where citizens, businesses, and local governments jointly produce and share decentralized renewable energy. In the European Union, the Renewable Energy Directive (RED II, 2018/2001/EU) defines renewable energy communities as legal entities based on open and voluntary participation, autonomous, and effectively controlled by its members in the proximity of renewable energy projects. It also stresses that its primary purpose is to provide environmental, economic, or social benefits for its members rather than financial profits.

Community energy is still an emerging concept in the European Union, and while its potential role in energy poverty mitigation is recognized, there is still limited empirical evidence (Caramizaru and Uihlein, 2020; Hanke *et al.*, 2021).

In this context, the Local Partnership of Telheiras – a network of around 20 local non-profit organizations – and the Lumiar Civil Parish – the local government in the target territory – are promoting a renewable energy community with the direct involvement and empowerment of citizens and local associations in the investment and management of decentralized solar photovoltaic systems (Figure 6). In its pilot project, the energy community members will jointly invest in the installation of a 7.0



Figure 6. The Telheiras Renewable Energy Community (Viver Telheiras, 2023)

kWp solar photovoltaic system (16 solar panels) in a public building, with the generated electricity being used by the building itself (managed by the Lumiar Civil Parish) and being shared with 16 local households (Sequeira *et al.*, 2023a).

The entrance fee in the energy community, which is still a significant amount needed to acquire the solar photovoltaic system, can pose an important barrier to the participation of energy-poor and vulnerable families (Ferreira, 2023). Thus, the project developed specific conditions to foster their involvement while streamlining a tailored and targeted approach to communicate and engage with these potentially hard-to-reach households. Energy-poor families – identified and engaged by the social support services of the local government and by other social support institutions – can join the energy community without the need for initial investment and paying only a reduced annual participation fee; the remaining costs are covered by the local government and by the other participants (Sequeira *et al.*, 2023a). Nevertheless, the energy community is legally constituted as a non-profit association, and equal voting rights and benefits are ensured for all participants, irrespective of their financial contribution.

Several challenges remain in the way of the widespread implementation of renewable energy communities. The empirical experience of this case study highlights the critical barriers of lack of knowledge in citizens and local governments, maintenance of community engagement during the planning stage, permitting and licensing of solar photovoltaic systems, the long-term sustainability of the financial and operational model, and engagement of energy-poor households (Ferreira, 2023). Thus, renewable energy communities will not spontaneously generate without providing information and technical expertise at the local scale. Furthermore, targeted funding streams must be available to partially cover the investment and operational costs of non-profit renewable energy communities to benefit energy-poor families.

Meaningfully engaging local stakeholders

The first case study shows the need to go beyond digital-only approaches and move the action arena to the local scale in the proximity of citizens. The two other case studies share the similarity of seeking the active involvement of a well-established network of local partners, including local governments and community middle actors such as social support institutions and non-profit associations, to build trust and leverage community engagement in energy efficiency and renewable energy. They also identify the need for targeted and tailored approaches to effectively engage with harder-to-reach segments of the populations, such as energy-poor and vulnerable households. These empirical insights resonate with an emerging but still scarce scientific literature that attributes a potentially important role for local intermediaries in just energy transitions (*e.g.*, Sequeira and Melo, 2020; Horta *et al.*, 2019; Ramsden, 2020).

In this context, Sequeira *et al.* (2023b) identified a gap in the literature regarding the actual views of these local organizations on their proposed involvement in energy issues, particularly their willingness to participate, the potential contributions they can offer, and their unmet needs to unlock deeper collaboration. These authors mapped around 200 local stakeholders in the Setúbal municipality to address this gap. They conducted semi-structured exploratory interviews with a subset of 35 organizations that agreed to participate in the research.

The interviewed local stakeholders are heterogeneous, representing the active dynamics of the territory, including local governments, energy agencies, social support and health institutions, arts and sports clubs, and community associations (Sequeira *et al.*, 2023b). Figure 7 shows the potential roles the interviewed organizations claim to be able and/or interested in providing regarding the deployment of energy-related support. Notably, most interviewed stakeholders mention environmental concerns, participation in the community, and social support to vulnerable populations as critical drivers for the proposed collaboration in energy issues. Although they are willing, key barriers hinder their ability to effectively contribute, namely scarce human resources, lack of time and other priorities, financing and infrastructure concerns, and low receptivity in their target audiences (Sequeira *et al.*, 2023b).

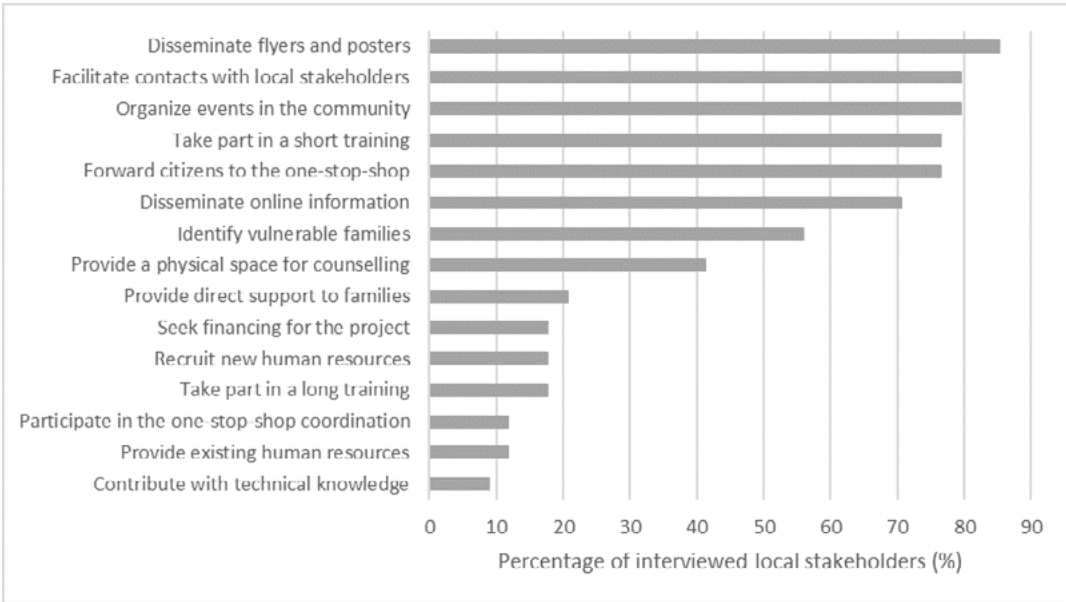


Figure 7. Potential roles of local stakeholders in energy support (Sequeira *et al.*, 2023b).

To overcome these challenges, Sequeira *et al.* (2023b) argue that there is a dire need for dedicated funding, time, and resources to ensure meaningful, effective, and comprehensive collaboration with local organizations on energy-related projects that strive to leverage the energy transition at the local scale. Finally, national governments should create regulatory, financial, and technical conditions so that approp-

ches such as energy efficiency one-stop shops and renewable energy communities (or even a combination of the two) can blossom and contribute to just energy transitions that mitigate energy poverty.

Conclusions

The imperative for an energy transition has never been more pressing, driven by the need to mitigate climate change and respond to fossil fuel prices crises, as the IPCC underscored (2023). Recognizing this urgency, the IEA (2023) advocates for the accelerated implementation of renewable energy sources and enhanced energy efficiency as foundational elements of this transformative process. Crucially, this transition must be characterized by justice and inclusiveness, adhering to the principle of “leaving no one behind” and ensuring universal access to safe, sustainable, modern, and affordable energy, as articulated by the UN (2015). However, inequality’s rising and pervasive societal challenge persists within and between countries, eluding mitigation through conventional economic growth strategies (UNDESA, 2020).

Energy poverty, a complex issue with widespread ramifications, reverberates across the EU, affecting millions of lives through a nexus of inadequate housing infrastructure, economic constraints, and soaring energy costs. Our examination of the Portuguese context, a southern EU country, revealed contributing factors to the persistence of energy poverty, including high residential energy consumption, an aged and inefficient building stock, and the absence of energy-efficient heating and cooling systems.

While the current European approach, integrating energy poverty into broader decarbonization policies, presents advantages in an economically vulnerable context like Portugal, social divisions emerge, particularly favoring those with higher incomes, literacy levels, and education. Social advantages or disadvantages are not mutually exclusive and can have a cumulative nature, with the effect of worsening these divisions. To address these issues effectively, we advocate for a more comprehensive cross-sectional analysis across diverse policy goals within European decarbonization policy.

Our research underscores the significant potential of renovation measures to reduce energy needs, enhance indoor thermal comfort, and mitigate vulnerability to energy poverty in Portuguese households. We emphasize the importance of integrating active energy efficiency measures within a broader strategy that prioritizes passive energy efficiency as a lasting and systemic solution.

Drawing insights from empirical case studies of pilot projects promoting just energy transitions, we highlight the pivotal role of local-scale action in eradicating energy poverty and fostering renewable energy adoption. While advocating for a diversified strategy synergistically contributing to a just energy transition and climate change

mitigation, we acknowledge the formidable challenges that lie ahead. Despite these challenges, our work points to a substantial potential for transformative strategies, offering a beacon of hope for a more just, sustainable, and equitable energy future.

Acknowledgments

The Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT) has supported the PhD Scholarships of Pedro Palma (SFRH/BD/146732/2019), Katherine Mahoney (SFRH/BD/147925/2019), Miguel Macias Sequeira (2020.04774.BD) and Salomé Bessa (2023.00525.BD). All authors are also thankful for the support provided to CENSE by FCT through the strategic project UIDB/04085/2020.

Furthermore, this publication has been carried out as part of the activities programmed within the framework of the LINCGLOBAL VibRA-IS project, funded in the 2022 call by the Higher Council for Scientific Research (CSIC) of the European Union, with reference LNCGL20023.

References

- ADENE. (2023). Statistics of energy performance certification. ADENE, Portuguese Energy Agency. Available at: <https://www.sce.pt/estatisticas/>
- Ambrose, A., Baker, W., Batty, E., and Hawkins, A. (2019). Reaching the "Hardest to Reach" with energy advice: final report. Sheffield Hallam University, Centre for Regional Economic and Social Research. <https://doi.org/10.7190/cresr.2019.8286642862>
- Antepara, I., Papada, L., Gouveia, J.P., Katsoulakos, N., Kaliampakos, D. (2020). Improving Energy Poverty Measurement in Southern European Regions through Equivalization of Modeled Energy Costs. *Sustainability*. 12, 5721. <https://doi.org/10.3390/su12145721>
- Ballesteros-Arjona, V., Oliveras, L., Bolívar Muñoz, J., Olry de Labry Lima, A., Carrere, J., Martín Ruiz, E., Peralta, A., Cabrera León, A., Mateo Rodríguez, I., Daponte-Codina, A., & Marí-Dell'Olmo, M. (2022, May). What are the effects of energy poverty and interventions to ameliorate it on people's health and well-being?: A scoping review with an equity lens. *Energy Research & Social Science*, 87, 102456. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102456>
- Boemi, S. N., & Papadopoulos, A. M. (2019). Energy poverty and energy efficiency improvements: A longitudinal approach of the Hellenic households. *Energy and Buildings*, 197(2019), 242–250. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.027>
- Bouzarovski, S., Frankowski, J., Tirado Herrero, S. (2018). Low-Carbon Gentrification: When Climate Change Encounters Residential Displacement. *International Journal Of Urban And Regional Research*. pp. 845-863. <https://doi.org/10.1111/1468-2427.12634>
- Bouzarovski, S., Tirado Herrero, S. (2017). The energy divide: Integrating energy transitions, regional inequalities, and poverty trends in the European Union. *European Urban and Regional Studies*. 1. 24. pp. 69-86. <https://doi.org/10.1177/0969776415596>
- Boza-Kiss, B., and Bertoldi, P. (2020). One-Stop-Shops for Energy Renovations of Buildings. Joint Research Centre Science for Policy Report (JRC113301). European Commission. Available at: <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/publications/one-stop-shops-energy-renovations-buildings>
- BPIE (2020). On the way to a climate-neutral Europe – Contributions from the building sector to a strengthened 2030 climate. Buildings Performance Institute. Available at: <https://www.bpie.eu/publication/on-the-way-to-a-climate-neutral-europe-contributions-from-the-building-sector-to-a-strengthened-2030-target>

- Calouste Gulbenkian Foundation (2023). Transition Point: Pilot project to combat energy poverty in Portugal. Available at: <https://gulbenkian.pt/en/initiatives/sustainable-development-programme/climate-action/transition-point/>
- Caramizaru, A., Uihlein, A. (2020). Energy communities: an overview of energy and social innovation. EUR 30083 EN. JRC119433. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-10713-2. <https://doi.org/10.2760/180576>
- Carvalho, A., Schmidt, L., Duarte Santos, F., Delicado, A. (2013). Climate change research and policy in Portugal. WIREs Climate Change. Doi:10.1002/wcc.258
- Castaño-Rosa, R., Barrella, R., Sánchez-Guevara, C., Barbosa, R., Kyprianou, I., Paschalidou, E., Thomaidis, N.S., Dokupilova, D., Gouveia, J.P., Kádár, J., Hamed, T.A. and Palma, P. (2021) Cooling Degree Models and Future Energy Demand in the Residential Sector. A Seven-Country Case Study. Sustainability, 13, 2987. <https://doi.org/10.3390/su13052987>
- CENSE FCT-NOVA, and De Groene Grachten (2020). Menu de Renovação Verde [“The Green Menu”]. CENSE - Center for Environmental and Sustainability Research, FCT-NOVA - NOVA School of Science and Technology, NOVA University of Lisbon, De Groene Grachten. Available at: <https://www.menurenovacaoverde.pt>
- Cunha, B, F, F., Carani, C., Nucci, C, A., Castro, C., Santana Silva, M., Andrade Torres, E. (2021). Transitioning to a low carbon society through energy communities: Lessons learned from Brazil and Italy. Energy Research & Social Science. 75. 101994
- CYPE, S.A. (2013). Ingenieros, Gerador de preços para construção civil. Available at: [<http://www.geradordeprecos.info/>]
- DGEG (2021) Energy in Numbers. Directorate-General of Energy and Geology. Energy Observatory. Available at: <https://www.observatoriodaenergia.pt/pt/comunicar-energia/post/9132/energia-em-numeros-edicao-2021/>
- DGEG (2022). Energy Statistics. Directorate-General of Energy and Geology. Available at: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/>
- DGEG (2023b). Energy Balance 2021 - Provisory. Directorate General for Energy and Geology. Available at: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/indicadores-energeticos/>
- DGEG (2023a). Energia em Números, edição 2022. DGEG. Available at: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/destaques/energia-em-numeros-edicao-2022/>
- Dobbins, A., Fuso Nerini, F., Deane, P., Pye, S., 2019. Strengthening the EU response to energy poverty. Nat. Energy 4, 2–5. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0316-8>
- EDP. (2021). Know the Origin of Energy. Energies of Portugal. Available at: <https://www.edp.pt/origem-energia/>

- EPAH (2021). Energy Poverty Advisory Hub ATLAS. Energy Poverty Advisory Hub. DG. Energy. European Commission. Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/epah-atlas_en
- EPAH (2022a). Introduction to the Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) Handbooks: A Guide to Understanding and Addressing Energy Poverty. Energy Poverty Advisory Hub. DG Energy. European Commission. Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/publications/publications/introduction-energy-poverty-advisory-hub-epah-handbooks-guide-understanding-and-addressing-energy_en
- EPAH (2023a). Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) Calls for technical assistance. Energy Poverty Advisory Hub. DG Energy. European Commission Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/get-support/call-technical-assistance_en
- EPAH (2023b). Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) online courses. Energy Poverty Advisory Hub. DG Energy. European Commission Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/get-support/epah-online-courses_en
- EPAH (2023c). Energy Poverty Advisory Hub (EPAH) Indicators Dashboard. Energy Poverty Advisory Hub. DG Energy. European Commission. Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/observing-energy-poverty/national-indicators_en
- European Commission (2019). Clean energy for all Europeans. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. ISBN 978-92-79-99835-5. <https://doi.org/10.2833/9937>
- European Commission (2020). A Renovation Wave for Europe – Greening our Buildings, Creating Jobs, Improving Lives. Available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- European Commission (2023). Commission Recommendation (EU) 2023/2407 on energy poverty. European Commission. <http://data.europa.eu/eli/reco/2023/2407/oj>
- European Commission (EC) (2023a). The European Green Deal Striving to be the first climate-neutral continent. European Commission, available at: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- European Commission (EC) (2023b). Renovation Wave. European Commission, available at: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en
- European Commission (EC). (2018). A Clean Planet for all. A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy. European Commission Communication. Brussels. Available at: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/pages/com_2018_733_en.pdf

- EEA (2023). Greenhouse gas emissions from energy use in buildings in Europe. In Indicators. European Environment Agency. Available at: [<https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-energy>]
- European Union (EU) (2014). European Economy, Occasional Papers 202, The Economic Adjustment Programme for Portugal 2011-2014. European Commission, Brussels, October.
- European Union (EU) (2019). Clean energy for All Europeans. March 2019, Luxembourg: Publications Office of the European Union
- EUROSTAT. (2023). Renewable energy statistics. EUROSTAT Statistics Explained. January 2023. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Renewable_energy_statistics#Share_of_renewable_energy_more_than_doubled_between_2004_and_2021
- Ferreira, E. (2023). Renewable Energy Communities: Concepts, Approaches and the Case Study of Telheiras Neighborhood in Lisbon. Master Thesis in Renewable Engineering, FCT-NOVA University of Lisbon.
- Fowler, T., Southgate, R.J., Waite, T., Harrell, R., Kovats, S., Bone, A., Doyle, Y., Murray, V. (2014). "Excess winter deaths in Europe: a multi-country descriptive analysis." *European Journal of Public Health*. 25. No.2. pp. 339–345
- Gabriel, M. F., Cardoso, J. P., Felgueiras, F., Azeredo, J., Filipe, D., Conradie, P., Van Hove, S., Mourão, Z., Anagnostopoulos, F., & Azevedo, I. (2023). Opportunities for Promoting Healthy Homes and Long-Lasting Energy-Efficient Behaviour among Families with Children in Portugal. *Energies*, 16(4), 1872. <https://doi.org/10.3390/en16041872>
- Gouveia, J.P., Palma, P., Simoes, S. (2019). Energy poverty vulnerability index: A multi-dimensional tool to identify hotspots for local action. *Energy Reports*. 5. pp. 187-201. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.12.004>
- Gouveia, J.P., Palma, P., Bessa, S., Mahoney, K., Sequeira, M. (2022). Energy Poverty National Indicators: Insights for a more effective measuring. *Energy Poverty Advisory Hub*. DG Energy. European Commission. Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/publications/publications/energy-poverty-national-indicators-insights-more-effective-measuring_en
- Gouveia, J.P., Bessa, S., Palma, P., Mahoney, K., Sequeira, M. (2023a). Energy Poverty National Indicators: Uncovering New Possibilities for Expanded Knowledge. *Energy Poverty Advisory Hub*. DG Energy. European Commission. Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/publications/publications/energy-poverty-national-indicators-insights-more-effective-measuring_en
- Gouveia, J. P., Mendes, M., Palma, P., and Sequeira, M. M. (2023b). Impact Report: Transition Point – A mobile one-stop shop for energy poverty mitigation. Developed by CENSE, FCT-NOVA for Calouste Gulbenkian Foundation.

- Großmann, K. (2019). Using conflicts to uncover injustices in energy transitions: The case of social impacts of energy efficiency policies in the housing sector in Germany. *Global Transitions*. 1. pp. 148-156
- Hanke, F., Guyet, R., Feenstra, M. (2021). Do renewable energy communities deliver energy justice? Exploring insights from 71 European cases. *Energy Research & Social Science*, 80, 102244. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102244>
- Hasheminasab, H., Streimikiene, D., & Pishahang, M. (2023). A novel energy poverty evaluation: Study of the European Union countries. *Energy*, 264, 126157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126157>
- Healy, J.D., (2003). Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factors. *Journal of epidemiology and community health*. 57.10, pp. 784–789
- Horta, A., Gouveia, J. P., Schmidt, L., Sousa, J. C., Palma, P., and Simões, S. (2019). Energy poverty in Portugal: Combining vulnerability mapping with household interviews. *Energy and Buildings*, 203, 109423. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109423>
- IEA (2023). Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- INE (2019). Estatísticas da Construção e Habitação 2018. Statistics Portugal. Available at: https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOESpub_boui=358628647&PUBLICACOESmodo=2
- INE (2021). Base de Dados. Instituto Nacional de Estatística (Statistics Portugal). Available at: [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_base_dados]
- INE/DGEG (2021) Survey on Energy Consumption in the Domestic Sector. Statistics Portugal. Directorate General for Energy and Geology.
- IEA (2021). Portugal 2021 Energy Policy Review. International Energy Agency, Available at: <https://www.iea.org/reports/portugal-2021>
- IPCC (2023). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- IPCC (2006). Chapter 2 - Stationary Combustion. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jessel, S., Sawyer, S., & Hernández, D. (2019). Energy, Poverty, and Health in Climate Change: A Comprehensive Review of an Emerging Literature. *Frontiers in Public Health*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2019.00357>

- Kelly, S., and Pollitt, M. (2011). *The Local Dimension of Energy*. University of Cambridge, Electricity Policy Research Group. EPRG Working Paper 1103. Cambridge Working Paper in Economics 1114. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511996191.016>
- Kew, S. F., Philip, S. Y., G. J. van Oldenborgh., van der Schrier, G., Friederike E. L., Otto, R. V. (2019). The Exceptional Summer Heat Wave in Southern Europe 2017. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, pp. S49-S53.
- Matos, A., Delgado, J. M. P. Q., & Guimarães, A. S. (2022). Linking Energy Poverty with Thermal Building Regulations and Energy Efficiency Policies in Portugal. *Energies*, 15(1), 329. <https://doi.org/10.3390/en15010329>
- Mahoney, K., Gouveia, J., P., Lopes, R., Sareen, S. (2022). “Clean, green and the unseen: The CompeSA framework | Assessing Competing Sustainability Agendas in Carbon Neutrality Policy Pathways” *Global Transitions*. 4 pp. 45-57
- Mahoney, K., Lopes, R., Sareen, S., Gouveia, J.P. (2023). Perceptions of Competing Agendas in Carbon Neutrality Policies in Portugal: Adverse Impacts on Vulnerable Population Groups. Working Paper.
- Mahoney, K., Lopes, R., Sareen, S., Gouveia, J. P. (2024a). “Perceptions of Competing Agendas in Carbon Neutrality Policies in Portugal: Adverse Impacts on Vulnerable Population Groups” Working Paper
- Mahoney, K., Gouveia, J. P., Lopes, R. (2024b) “Loops, triangles and transitions- Participatory perspectives on energy poverty policies in Portugal” Working Paper
- Manjon, M. J., Merino, A., & Cairns, I. (2022). Business as not usual: A systematic literature review of social entrepreneurship, social innovation, and energy poverty to accelerate the just energy transition. *Energy Research & Social Science*, 90, 102624. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102624>
- McCoy, D., Kotsch, A. (2020). Quantifying the distributional impact of energy efficiency measures. Centre for Climate Change Economics and Policy Working Paper No. 340
- Mould, R., Baker, K. (2017). Documenting fuel poverty from the householders’ perspective. *Energy Research & Social Science*. 31. pp. 21-23.
- Mundaca, L., Rotmann, S., Ashby, K., Karlin, B., Butler, D., Sequeira, M. M., Gouveia, J.P., Palma, P., Realini, A., Maggiore, S., & Feenstra, M. (2023). Hard-to-Reach Energy Users: An ex-post cross-country assessment of behavioural-oriented interventions. *Energy Research & Social Science*, 104, 103205. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103205>

- Nikas, A., Stavrakas, V., Arsenopoulos, A., Doukas, H., Antosiewicz, M., Witajewski-Baltvilks, J., Flamos, A. (2020). Barriers to and consequences of a solar-based energy transition in Greece. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 35. pp. 383-399
- Oliveira, A., Lopes, A., Niza, S., Soares, A. (2022). An urban energy balance-guided machine learning approach for synthetic nocturnal surface Urban Heat Island prediction: A heatwave event in Naples. *Science of the Total Environment*. 805. 150130
- Omic, E., Halb, J. (2019). Energy Poverty in Europe- How Energy Efficiency and Renewables Can Help. Council of Europe Development Bank. 55, avenue Kléber, Paris - France. March 2019. Available at: https://coebank.org/media/documents/CEB_Study_Energy_Poverty_in_Europe.pdf
- Omri, A., Belaid, F. (2021). Does renewable energy modulate the negative effect of environmental issues on the socio-economic welfare? *Journal of Environmental Management*. 278. 111483
- OpenExp. (2019). European Energy Poverty Index-Assessing Member States' Progress in Alleviating The Domestic and Transport Energy Poverty Nexus. OpenExp. Available at: https://www.openexp.eu/sites/default/files/publication/files/european_energy_poverty_index-eeepi_en.pdf
- Osti, G. (2018). The uncertain games of energy transition in the island of Sardinia (Italy). *Journal of Cleaner Production*. 205. pp. 681-689
- Palma, P., Gouveia, J. P., & Simoes, S. G. (2019). Mapping the energy performance gap of dwelling stock at high-resolution scale: Implications for thermal comfort in Portuguese households. *Energy and Buildings*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.002>
- Palma, P., Gouveia, J. P., Mahoney, K., Bessa, S. (2022). It starts at home: Space heating and cooling efficiency for energy poverty and carbon emissions reduction in Portugal." *People, Place, and Policy*. pp. 1-20. DOI: 10.3351/ppp.2022.5344968696
- Palma, P., Gouveia, J. P., & Barbosa, R. (2022). How much will it cost? An energy renovation analysis for the Portuguese dwelling stock. *Sustainable Cities and Society*, 78 (August 2021). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103607>
- Palma, P., Gouveia, J.P. (2022). Bringing Energy Poverty Research into Local Practice - Exploring Subnational Scale Analysis. *Energy Poverty Advisory Hub*. DG Energy. European Commission Available at: https://energy-poverty.ec.europa.eu/discover/publications/publications/bringing-energy-poverty-research-local-practice-exploring-subnational-scale-analyses_en
- Palma, P., Gouveia, J.P., Climaco, N. (2023). Feasibility of decarbonizing residential buildings – challenges and proposals in the Portuguese Context. Report for the Portuguese Environmental NGO ZERO.

- Parente, J., Pereira, M.G., Amraoui, M., Fischer, E.M. (2018). Heat waves in Portugal: Current regime, changes in future climate and impacts on extreme wildfires. *Science of the Total Environment*. 631–632, pp. 534–549
- Portuguese Republic (2019a) National Energy and Climate Plan 2021-2030. Portugal. Portuguese Republic. Portugal.
- Portuguese Republic (2019b) National Roadmap for Carbon Neutrality 2050 (RNC 2050). Environmental Fund/Portuguese Environmental Agency. Portugal.
- Portuguese Republic (2021). *Estratégia de Longo Prazo para a Renovação dos Edifícios* (Long-term National Strategy for the Renovation of the Building Stock). Resolution of the Council of Ministers n.º 8-A/2021. Republic's Gazette, 1st Series, 23 pp 16-(2).
- Portuguese Republic (2023). *Estratégia Nacional de Longo Prazo para o Combate à Pobreza Energética* (Long-term National Strategy for Fighting Energy Poverty). Portugal.
- Ramsden, S. (2020). Tackling fuel poverty through household advice and support: Exploring the impacts of a charity-led project in a disadvantaged city in the United Kingdom. *Energy Research & Social Science*, 70, 101786. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101786>
- Robić, S. (2016). *Energy Poverty in South East Europe: Surviving the Cold*. Eds Bouzarovski, S. University of Manchester.
- Rotmann, S. (2021). Case Study Analysis – Aotearoa, New Zealand. HTR Task Users TCP: Wellington. 70pp. <https://doi.org/10.47568/3XR112>
- Rotmann, S., Mundaca, L., Castaño-Rosa, R., O'Sullivan, K., Ambrose, A., Marchand, R., Chester, M., Karlin, B., Ashby, K., Butler, D., and Chambers, J. (2020). *Hard-to-Reach Energy Users: A Literature Review*. User-Centred Energy Systems TCP - HTR Task. ISBN: 978-0-473-64983-8.
- Santamouris, M., Alevizos, S. M., Aslanoglou, L., Mantzios, D., Milonas, P., Sarelli, I., Paravantis, J. A. (2014). Freezing the poor – Indoor environmental quality in low and very low-income households during the winter period in Athens. *Energy and Buildings*. 70. pp. 61–70
- Santos, C., & Matias, L. (2006). *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios ite 50*. LNEC. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Sareen, S. (2020). Social and technical differentiation in smart meter rollout: embedded scalar biases in automating Norwegian and Portuguese energy infrastructure. *Humanities & Social Sciences Communications*. 7:25
- Sareen, S., Wolf, S., (2021). Accountability and sustainability transitions. *Ecological Economics*. 185. 107056

- Schleich, J. (2019). Energy efficient technology adoption in low-income households in the European Union – What is the evidence? *Energy Policy*, 125, 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.061>
- Sequeira, M., and Melo, J.J. (2020). Energy saving potential in the small business service sector: Case study Telheiras neighborhood, Portugal. *Energy Efficiency*, 13, 551-569. <https://doi.org/10.1007/s12053-020-09842-y>
- Sequeira, M.M., Gouveia, J.P. and P. Palma (2021). Case Study Analysis – Portugal. HTR Task Users TCP: Lisbon. 38pp. <https://doi.org/10.47568/3XR115>
- Sequeira, M.M., and Gouveia, J.P. (2022). A Sequential Multi-Staged Approach for Developing Digital One-Stop Shops to Support Energy Renovations of Residential Buildings. *Energies* 2022, 15, 5389. <https://doi.org/10.3390/en15155389>
- Sequeira, M.M., Ferreira, E., Martins, H., Gouveia, J.P., e Pereira, L.K. (2023a). Practical guide for the construction of renewable energy communities by citizens, non-profit associations, and local governments – Telheiras Renewable Energy Community. Available at: <http://vivertelheiras.pt/certelheiras>
- Sequeira, M.M., Gouveia, J.P., and Melo, J.J. (2023b). Can local organizations contribute to just energy transitions? Exploring potential roles as intermediaries in energy support. *Energy Economics International Conference, 7th APEEN Annual Conference*, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa 2-3 November 2023, Lisbon, Portugal.
- Sherriff, G., Butler, D., Brown, P. (2022). The reduction of fuel poverty may be lost in the rush to decarbonise': Six research risks at the intersection of fuel poverty, climate change and decarbonisation. *People, Place and Policy*, pp. 1-20
- Silva, L., Sareen, S. (2023). "The calm before the storm? The making of a lithium frontier in transitioning Portugal" *The Extractive Industries and Society*. 15. 101308
- Smid, M., Russo, S., Costa, A, C., Granell, C., Pebesma, E. (2019). Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves. *Urban Climate*. 27. pp. 338-402
- Standal, K., Dotterud Leiren, M., Alonso, I., Azevedo, I., Kudrenickis, I., Maleki-Dizaji, P., Laes, E., Rosaria Di Nucci, M., Krug, M. (2023). Can renewable energy communities enable a just energy transition? Exploring alignment between stakeholder motivations and needs and EU policy in Latvia, Norway, Portugal and Spain. *Energy Research & Social Science*. 106. 103326
- Stern, N., Patel, I, G., Ward, B. (2021). Covid-19, climate change, and the environment: a sustainable, inclusive, and resilient global recovery. *BMJ*. 2021 Oct 6, 375, 2405
- Stojilovska, A., Dokupilová, D., Gouveia, J. P., Bajomi, A. Z., Tirado-Herrero, S., Feldmár, N., Kyprianou, I., & Feenstra, M. (2023). As essential as bread: Fuelwood use as a cultural practice to cope with energy poverty in Europe. *Energy Research and Social Science*, 97 (September 2022). <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.102987>

- Stojilovska, A., Guyet, R., Mahoney, K., Gouveia, J.,P., Castaño-Rosa, R., Živčič, L., Barbosa, R., Tkalec, T. (2022). Energy poverty and emerging debates: Beyond the traditional triangle of energy poverty drivers.” *Energy Policy*. 169. 113181
- IPCC (2021). *Climate Change 2021 The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Available at: <https://www.ipcc.ch/>
- UNDESA (2020). *World Social Report 2020: Inequality in a rapidly changing world*. United Nations Department of Economic and Social Affairs. ISBN 978-92-1-130392-6. Available at: <https://www.un.org/development/desa/dspd/world-social-report/2020-2.html>
- United Nations (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Available at: <https://sdgs.un.org/>
- UNCTAD (2020). *Developing countries pay environmental cost of electric car batteries*. United Nations Conference on Trade and Development. Available at: unctad.org/news/developing-countries-pay-environmental-cost-electric-car-batteries
- Viver Telheiras (2023). *Comunidade de Energia Renovável de Telheiras* [“Telheiras Renewable Energy Community”]. Available at: <http://vivertelheiras.pt/certelheiras>
- Vondung, F., Thema, J. (2019). Energy poverty in the EU – indicators as a base for policy action. *ECEEE Summer Study 2019 Partners*. pp. 569-578
- Webber, P., Gouldson, A., Kerr, N. (2015). The impacts of household retrofit and domestic energy efficiency schemes: A large scale, ex-post evaluation” *Energy Policy*. 84. 35-43

Capítulo 5

Cosmo-Convivencia Armónica desde la Compresión Andina

Pacha Yapucha Yampara Blanco

Facultad de Arquitectura, Artes Diseño y Urbanismo, Universidad
Mayor de San Andrés – Bolivia

Correo electrónico: pyyampara@umsa.bo

Resumen

La crisis climática, energética, hídrica en la que se vive nos obliga a buscar alternativas para revertir lo ocasionado, en ese camino de búsqueda se recuerda una sabiduría aymara, *qhip-nayra uñtasawa sartaña*: mirando atrás y adelante debemos caminar para llegar a un equilibrio y armonía. En ese sentido se considera que la alternativa no se encuentra solo buscando en el futuro, sino también se debe buscar y aprender del pasado, allí encontramos al paradigma de vida de los pueblos ancestrales SUQQA que se basaban en el respeto y convivencia armónica con los otros seres con quienes se coexiste y convive. El pasado nos hace comprender el significado profundo de la cosmo-convivencia muy distinto al significado reducido moderno de solo vivir, sobre todo del vivir humano.

Venimos de una cultura que respeta la vida, sin embargo, esta comprensión se fue diluyendo y olvidando gracias a la seducción de la lógica mercantil capitalista del paradigma de desarrollo y progreso en el que vivimos. Este paradigma hegemónico ha ocasionado las crisis en la que vivimos, comprometiendo un bienestar para las generaciones venideras y para nosotros mismos. Hoy se busca reflexionar sobre sostenibilidad, armonía con el medio ambiente, prácticas que eran parte de la forma de vida de los pueblos ancestrales, por eso es importante mirar el pasado para aprehender y comprender que no solo vivimos en la lógica material sino que se debe llegar a un complemento y armonía con lo espiritual, respetando el espacio-tiempo de cada ser biótico que conforma el pluriverso de mundos.

Palabras clave: Paradigma de vida, pluriverso de mundos, paridad, arquitectura de tierra, territorio andino.

Abstract

The climate, energy, and water crisis in which we live forces us to look for alternatives to reverse what has been caused. On this path of search, we remember an Aymara wisdom, *qhip-nayra uñtasawa sartaña*: looking back and forward we must walk to reach a balance and harmony. In that sense, it is considered that the alternative is not only found by searching in the future, but must also be sou-

ght and learned from the past, there we find the paradigm of life of the SUQQA ancestral peoples who were based on respect and harmonious coexistence with others. beings with whom one coexists and lives. The past makes us understand the deep meaning of cosmo-coexistence, very different from the modern reduced meaning of just living, especially human living.

We come from a culture that respects life, however, this understanding was diluted and forgotten thanks to the seduction of the capitalist commercial logic of the paradigm of development and progress in which we live. This hegemonic paradigm has caused the crises in which we live, compromising the well-being of future generations and ourselves. Today we seek to reflect on sustainability, harmony with the environment, practices that were part of the way of life of ancestral peoples, that is why it is important to look at the past to apprehend and understand that we not only live in material logic but that we must reach a complement and harmony with the spiritual, respecting the space-time of each biotic being that makes up the pluriverse of worlds.

Keywords: Paradigm of life, pluriverse of worlds, parity, earth architecture, Andean territory.

Introducción

El territorio de los Andes es un espacio tiempo de mucha sabiduría ancestral, uno de ellos y la base para la comprensión de la vida es el *Suman Qama Qamaña SUQQA*, paradigma de los pueblos andinos que trata de un saber vivir y convivir bien en equilibrio y armonía con el pluriverso de mundos. En este paradigma ancestral todos los seres bióticos son importantes, porque en la lógica andina todo tiene vida, por eso merecen respeto y necesitan su espacio-tiempo, aquí no prevalece el hombre sobre el resto como ocurre en el paradigma occidental. El territorio y la casa también tienen vida y tienen ciclos y dinámicas que se deben comprender. En el caso del territorio se respetaban espacios-tiempos para el pluriverso de mundos, espacio para las plantas, para los animales, para las *w'akas* o deidades, no se explotaba a beneficio de unos cuantos, incluso la tierra-territorio pasaba por un proceso de *püruma*: descanso de siete años para recobrar la fertilidad. De esta manera se comprende que todos los seres de este mundo tienen ciclos que se deben respetar para llegar a un equilibrio.

Al igual que el territorio, la casa tiene su propia dinámica, el uso de materiales naturales era para el confort humano, animal y también de la tierra, ya que no se generaban residuos conocidos en la construcción moderna como escombros, los materiales volvían a la tierra sin afectarla. Por otro lado, la casa tiene una explicación simbólica que responde a la cosmogonía de los pueblos y su forma de comprender la vida. Son aspectos que llaman a reflexionar y nos invitan a estudiar la arquitectura ancestral porque no solo son construcciones que buscaban lo estético, funcional, sino tienen una comprensión mucho más profunda.

Con el paso del tiempo toda esta sabiduría se fue encubriendo, para muchos no tiene importancia por ser del pasado, pero es importante conocer la comprensión de la cosmo-convivencia andina para tener alternativas a la lógica antropocéntrica que ha ocasionado la crisis en la que se vive.

Objetivo

Compartir la sabiduría de los pueblos ancestrales desde la comprensión andina, reflexionar y estudiar como una alternativa a la crisis climática que se vive en la actualidad.

Metodología

El trabajo presentado es parte de investigaciones realizadas que se iniciaron en 2015 para redignificar la sabiduría ancestral andina, teniendo como centro la comprensión de la casa y el territorio. La metodología consiste en un reconocimiento del territorio, visita a los pueblos andinos, realizar la observación de campo junto a registros fotográficos y charlas ocasionales con mi papá y mamá u otras personas que van sumando la sabiduría ya conocida. Todo esto se fortalece con lecturas sobre el territorio andino y la arquitectura de los pueblos ancestrales, que son base fundamental para la explicación del contexto territorial desde donde se desencadena la comprensión de vida. El territorio se puede comprender como un espacio mayor que alberga elementos menores como la casa, que tiene sus particularidades y significado profundo.

Resultados y discusión

Como parte de los resultados vamos a exponer lo que se ha podido conocer y redignificar este último tiempo referido a la casa andina y su paradigma de vida, al ser un tema desconocido y poco estudiado, esta comprensión permite redescubrir la sabiduría ancestral de los pueblos que fue mutilada y olvidada al pasar de los años, pero nos permite vislumbrar una alternativa para la crisis climática que la humanidad está enfrentando.

Paradigma de vida

Para comprender la arquitectura de los pueblos andinos, es necesario comprender su paradigma de vida *Suma Qama Qamaña*, como se conoce en la actual Bolivia y el *Sumaj Kawsay* en Ecuador. En la actualidad se quiere reducir la comprensión de este paradigma de vida simplemente a un “buen vivir” o “vivir bien”, sin embargo, la comprensión de este paradigma es amplio, tal vez una aproximación podría entenderse como el saber vivir y convivir con el pluriverso de mundos en complemento y armonía.

Desde la comprensión del pueblo *qulla* aymara todo tiene vida y todo en la vida es *ayni*, principio de vida del paradigma *Suma Qama Qamaña*. Cada ser biótico pertenece a un “mundo” que convive con los otros “mundos” para conformar la urdimbre de la vida, todos son importantes, ninguno está por encima del otro. Como personas pertenecemos al mundo de la gente, o el ser *jaqi*, desde la comprensión andina una

persona se convierte en *jaqi* cuando está complementada y equilibrada por la pareja, es decir cuando está en paridad (mujer-hombre), de donde surge el nuevo nido o casa y la nueva semilla o familia.

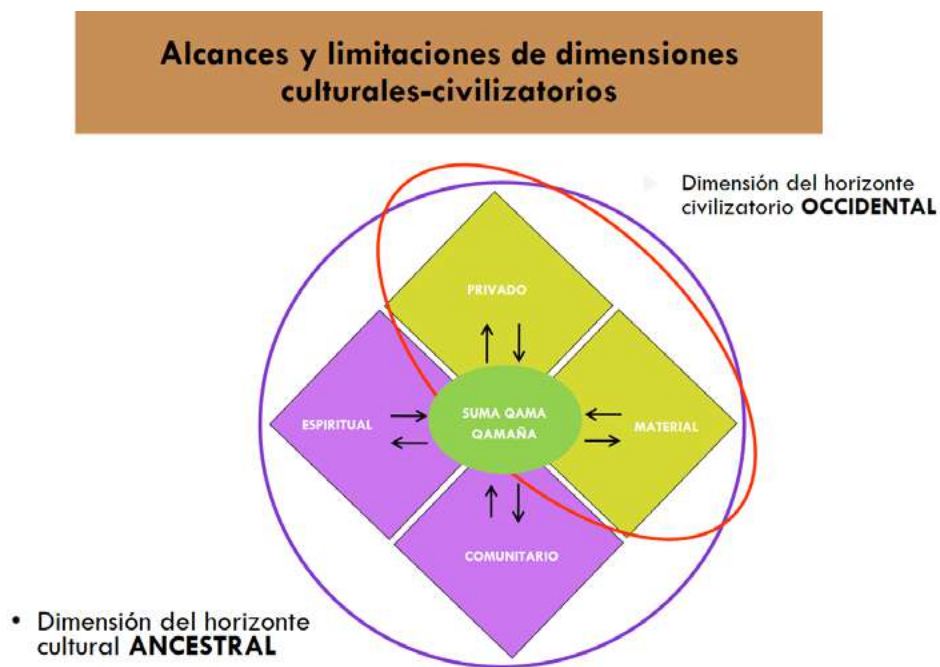
El mundo del *jaqi* convive con el *yapu*: mundo de las plantas, a la vez conviven con el *uywa*: mundo animal y conviven con la *japhalla*: mundo de las *wak'as* o deidades, entre todos conviven en un ser mayor que se conoce como *uraqpacha*: mundo de la tierra. Estos “mundos” conforman el pluriverso de mundos que se relacionan por medio de ceremonias rituales en tiempos espacios específicos de los solsticios y equinoccios, tiempos de mayor concentración energética (21,22,23 de junio *Mara taq'a*, 21,22,23 de septiembre *Sata qallta*, 21,22,23 de diciembre *Illa pacha* y 21,22,23 de marzo *Achuqa punchawi*). Entre estos tiempos de solsticios y equinoccios se encuentran fechas intermedias que también son tiempos espacios de mucha concentración de energía (1,2,3 de agosto tiempo de la pachamama, 1,2,3 de noviembre tiempo del *amayanak uru*, 1,2,3 de febrero tiempo del *anata* andino y 1,2,3 de mayo tiempo de la *chakana*). Tiempos espacios donde la pachamama tiene hambre y son tiempos propicios para realizar el *ayni* biótico. La reciprocidad no solo está con la madre tierra sino también con los otros componentes del pluriverso de mundos, es allí donde se podría alcanzar una armonía con el medio ambiente, que para los *qollas* es comprendido como una cosmoconvivencia armónica con el medio ambiente o la pachamama.



Figura 1. Pluriverso de mundos para la Qamaña. Elaboración con base en las lecturas de Simón Yampara
Fuente: elaboración propia.

Horizontes culturales y civilizatorios

En el actual territorio andino se presentan dos horizontes culturales y civilizatorios, por un lado, está el horizonte cultural ancestral que ha pervivido y resistido a pesar de la hegemonía colonial, es parte de la herencia cultural de los pueblos andinos. Este horizonte se conforma por dimensiones que están en complemento y armonía para alcanzar el *suma qama qamaña*. La dimensión material debe complementarse y equilibrarse con la dimensión espiritual, la dimensión privada se complementa y equilibra con la comunitaria, de esa manera se genera el “orden” andino. Es más, la figura que componen estas dimensiones (entre amarillas y moradas en la figura 2) es un cuadrado, todos sus lados iguales que se asocia al principio de equidad con el que se guía el horizonte cultural ancestral.



Fuente: elaboración propia, en base a Simón Yampara

Figura 2. Alcances y limitaciones de los horizontes culturales y civilizatorios con base en Simón Yampara

Fuente: elaboración propia.

En cambio, desde el horizonte civilizatorio occidental, prevalece la dimensión material sobre la espiritual, importa más generar ganancias económicas antes que un bienestar espiritual. Prevalece lo privado sobre lo comunitario (color amarillo en la figura 2), importa más la lógica individualista de acumulación que el compartir comunitario. De esta manera se genera una asimetría e inequidad que se traducen en la forma compuesta rectangular por estas dos dimensiones, el rectángulo tiene dos lados distintos lo que se asocia al principio de inequidad. Base del horizonte civilizatorio occidental, donde unos pocos son favorecidos a costa del resto.

El territorio andino

Cuando hablamos desde la lógica andina, debemos hablar necesariamente del territorio porque está estrechamente relacionada con la forma de vida. Si reflexionamos sobre el territorio andino nos damos cuenta que la distribución y comprensión es totalmente distinta a la que conocemos actualmente después de la consolidación de las repúblicas. El territorio andino de la región *qolla* abarca desde la costa del Pacífico hasta los llanos orientales próximos a la actual Brasil. En la figura 3 podemos ver la diferencia de la extensión territorial de la actual Bolivia y la extensión del Qullasuyu, desde ahí se ven las diferencias en cuanto a las comprensiones.

La extensión del territorio *qolla* se puede explicar en la configuración que genera la *chakana* o cruz andina por la diferencia de los pisos ecológicos (color naranja) la relación y simbiosis entre toda esta ecología es importante para la *qamaña*: bienestar común, ya que se asegura una variedad de componentes nutritivos que se producen en cada piso ecológico, pero también cada uno de estos pisos (dentro del espacio tiempo material) está complementado por las energías de la profundidad (espacio tiempo

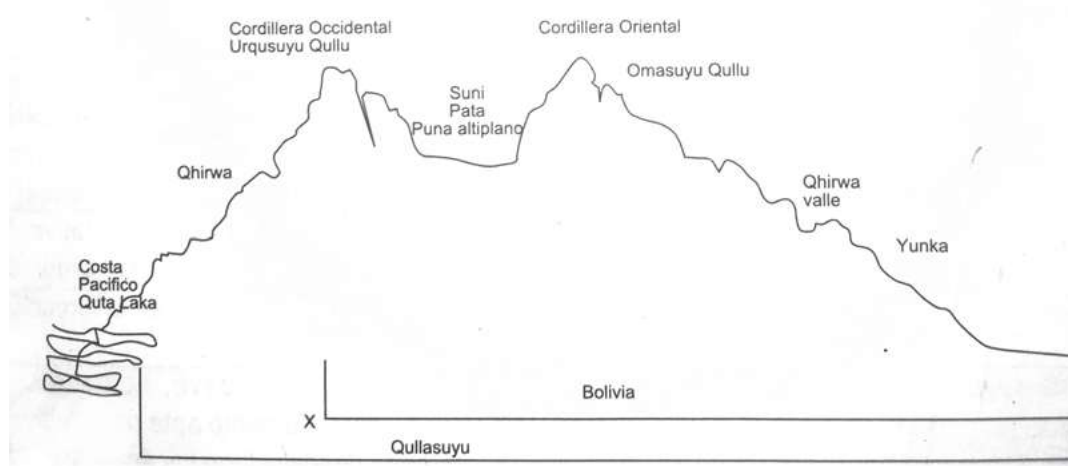


Figura 3. Fisiografía territorial de la región andina. **Fuente:** Simón Yampara (2001)



Figura 5. Usufructo territorial interno del ayllu- pilares tetralécticos de la estructura del ayllu-marka. **Fuente:** Simón Yampara (2001)

La casa nido criadora de vida

Parte importante del territorio es la casa, la razón para la existencia de una nueva célula habitacional es la *jaqichasiña*: emparejamiento, cada pareja necesitaba de un nido nuevo, donde se pudiera criar e iniciar como familia. En esta fiesta los padres, madres, padrinos y madrinan hacen una recomendación amplia a la nueva pareja, donde se habla del *suma qama qamaña*: un saber vivir y convivir bien en equilibrio y armonía, donde exista entendimiento. El equilibrio no solo es con la pareja, sino con el pluri-verso de mundos, por ello la configuración de la vivienda ancestral siempre ha estado ligada a la cosmo-convivencia con los otros mundos bióticos, no solo se concentra en el mundo de la gente.

La casa ancestral está compuesta por tres espacios macro. ***Uta manqha***: casa adentro, donde se encuentra la célula espacial privada de la familia, generalmente compuesta por la casa de base circular y la casa de base rectangular (*muququ-taru uta*), el ***uta anqa***: la casa afuera, constituida por los espacios que se encuentran alrededor de la casa, donde generalmente estaba la *qincha*: cocina a cielo abierto, la chacra, el espacio de los vacunos y ovinos. Estos dos espacios se articulan y relacionan en el ***uta taypi***: centro de la casa, teniendo como corazón al patio.

El patio es un espacio muy importante porque además de articular el *uta manqha* y *uta anqa* (relación horizontal), también articula las energías verticales, entre el *alaxpacha*: espacio tiempo de las alturas y el *manqhapacha*: espacio tiempo de la profundidad. Al parecer por esta conexión energética de relación horizontal y vertical, es un espacio muy importante donde se generan las reuniones familiares y celebraciones de la familia.

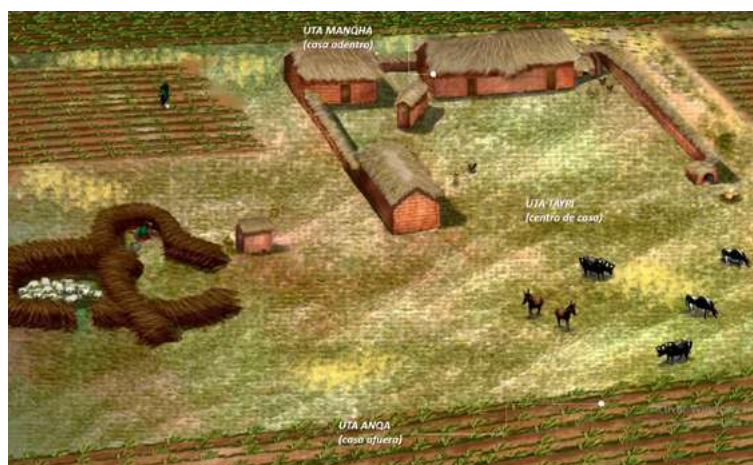


Figura 6. Configuración espacial de la casa ancestral de tierra.

Muruqu-taru uta: casa de base circular y rectangular

El *uta manqha*: casa adentro se articula por la paridad de casas comprendido como *muququ-taru uta*: casa de base circular y rectangular, allí se plasma lo simbólico en la arquitectura ancestral. La casa de base circular representa simbólicamente a la feminidad y la casa de base rectangular representa simbólicamente a la masculinidad, entre ambas se representa a la paridad andina *chacha-warmi*: hombre mujer, el complemento energético entre la feminidad y masculinidad para conformar el ser *jaqi*.

El *muququ uta*: casa de base circular es el elemento femenino, por su forma tipo cónica metafóricamente representa al útero materno, es el espacio donde toda la familia dormía conjuntamente (no existían habitaciones individuales), como si estuvieran “dentro un mismo útero”, por eso la casa es el útero mayor que cría la vida, cría a todos sus ocupantes que son una misma familia. Las puertas de estas casas generalmente son pequeñas representando la conexión al útero



Figura 7. Paridad en la configuración de la casa de tierra.

Fuente: elaboración propia.

Las casas de tierra

Un aspecto que llama la atención es la materialidad de la casa, el uso de la tierra tiene una comprensión significativa. El ser *jaqi*: pareja consagrada, criaba¹ sus nidos de tierra al igual que varios animalitos (mundo *uywa*), un claro ejemplo son los horneros, aves que al emparejarse van generando su nido. De la misma manera que las plantas (mundo *yapu*) se crían y cultivan en la tierra desde que son semilla. Al ser semejantes y pertenecer a mundos que conviven entre ellos las dinámicas eran las mismas, la mayoría vivía en nidos de tierra, que luego se alteran por la lógica antropocéntrica, donde las casas cambian de materiales naturales a materiales industrializados, perdiendo la relación energética con los materiales naturales, la naturaleza y perdiendo los beneficios que ofrecen, como el confort térmico, la regulación higrométrica entre otros.



Figura 8. Propiedades de inercia térmica.

Los materiales naturales nos relacionan estrechamente con el mundo natural, por eso se fueron utilizando una variedad de técnicas constructivas que forman parte de la tecnología apropiada del lugar, en las casas del altiplano se pueden distinguir al menos cuatro técnicas constructivas.

La **ch'ampa** o tierra cortada es una técnica ancestral de tradición uruchipaya, el proyecto *Coremans, criterios de intervención en la arquitectura en tierra* explica: son las piezas obtenidas al cortar suelos con vegetación, sea esta hierba, musgo, brezo o turba [...] los tapines, de grosor más pequeño, son habituales para techar y rematar cercas o muros. En Hispanoamérica se conoce como tepe, champa, cespedón, raigambre, gallón y cortadera (2017, p.52). Varias casas de base circular y rectangular estaban hechas de este material, sobre todo en las regiones donde escaseaban los arbustos, allí las casas de base circular eran hechas totalmente de *ch'ampas*, las cuales son

1. Se habla de la crianza y no de la construcción de la casa, porque la construcción es solo el acto de edificar materialmente, en cambio la crianza es con cariño, con mucha paciencia se iba criando la casa que va creciendo al igual que cualquier otro ser biótico.

piezas sacadas del suelo con follaje nativo que lo llaman “chiji” que al ser combinadas con “niqui”/greda arcilloso, eran útiles para la construcción, en lo posible con poco salitre, cortada y preparada al pasar la época de lluvias.

El **adobe** es la técnica milenaria más utilizada junto a las *ch'ampas*. Según el proyecto *Coremans, criterios de intervención en la arquitectura en tierra* indica que son piezas generalmente de forma de paralelepípedo, aunque existen también formas cúbicas y trapezoidales para realizar hornos, bóvedas o cúpulas y formatos aplantillados para formar aleros, golas o impostas[...] en primer lugar, se determina si la masa de barro necesita o puede prescindir de la ayuda de fibras, para evitar la fisuración en el secado, posteriormente se amasa la tierra o la mezcla con el grado de humedad necesario, se procede a llenar los moldes, enrasar y finalmente desmoldar la pieza, procurando que el secado sea al aire, preferiblemente a la sombra (2017, p.54). Varias casas de base circular y rectangular estaban hechas con adobe, las cubiertas de estas casas estaban realizadas con ramas de thola, arbusto de la región que eran amarradas para conformar los pares de la cubierta y finalmente techadas con paja.

La **tapia pisada** es una técnica que trabaja otro tipo de tierra distinto al adobe, según el proyecto *Coremans*, indica que son muros moldeados por compactación con ayuda de un pisón en el interior de un gran encofrado [...] la tapia es la técnica, mientras que el tapial es el encofrado [...] no todas las tierras son adecuadas para esta técnica, sino que trabaja con una proporción adecuada de arcilla, limo, arena y grava. Puede hacerse con tierra, yeso, carbón, conchas trituradas y otras sustancias que se apisonan dentro del tapial (2017, p.61). Esta técnica se utilizaba sobre todo para muros de cerco, en algunos casos se puede ver en las primeras hiladas de las casas de base rectangular.

La **tierra apilada** es otra técnica ancestral. El proyecto *Coremans* explica: "la tierra apilada se forma por amontonamiento de tierra con posterior refileado de los paramentos [...] resulta muy frecuente añadir fibras como cañas de cereal, crines o sarmientos y también dar un pequeño grado de compactación a su cara exterior, con una tablilla, o con un largo nervio animal en forma de látigo. Ambas acciones se suman a la presión producida por el trabajo manual del modelado" (2017, p.49). Esta técnica se utilizaba para generar principalmente el *q'iri*: fogón de arcilla, que se moldea para conformar la pieza final, también se modelan mobiliarios, como el *pathati*: cama de tierra.



Figura 9. Técnicas constructivas de construcción con tierra. **Fuente:** Elaboración propia.

Conclusión

La arquitectura ancestral tiene mucho para enseñarnos, no solo son casas antiguas, tienen toda una explicación profunda, desde una representación simbólica en paridad hasta la semejanza de vida con los otros mundos bióticos. Lo más llamativo es la relación metafórica del *murqu uta* con el útero, así entendemos la importancia espiritual de la casa, que no se reduce solo a la construcción material.

Por otro lado, es importante reflexionar que los materiales naturales u orgánicos nos vuelven a poner en relación con el mundo natural, del cual nos hemos alejado bastante desde la hegemonía de la Revolución industrial y la ciencia moderna que pone al hombre sobre los otros seres. La práctica del uso de la tierra exige una nueva forma de pensar por parte de la Arquitectura. Esto se asocia a la eficiencia económica y la pertinencia ecológica para no incrementar los GEI que aceleran el cambio climático. La tierra es un material bondadoso, que no genera daños ni en sus usuarios ni en la TIERRA, nos ofrecen más de lo que han consumido en su construcción.

Agradecimientos

Esta publicación se ha realizado como parte de las actividades programadas en el marco del proyecto LINCGLOBAL VIBRA-IS, financiado en la convocatoria 2022 por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de la Unión Europea, con referencia LNCGL20023.

Referencias

- Escalante, Javier. (1997) *Arquitectura Prehispánica en los Andes Bolivianos*. La Paz - Bolivia: CIMA.
- Marussi, Ferruccio (1999) *Arquitectura Vernacular: Los Putucos de Puno*. Universidad Ricardo Palma. Lima Peru.
- Proyecto COREMANS (2017) *Criterios de intervención en la arquitectura de tierra*. Ministerio de Educación, Cultura y deporte. España
- Sociedad científica de estudiantes- FAADU (2011) *Registro Documental de Arquitectura Vernácula*. La Paz-Bolivia
- Yampara, Pacha. (2019). La arquitectura de los pueblos milenarios del altiplano: una configuración femenina y masculina, jaqi andino. *Revista Nodo*, 14(27), pp. 8-23
- Yampara, Simón (2018). *Re emergencia del SUQQA, Un sistema, filosofía de vida alternativa a los mitos de Desarrollo-Progreso del SIMEKA cuajadura del cambio climático*. La Paz-Bolivia
- Yampara, Simón (2016). *Suma Qama Qamaña Paradigma Cosmo biótico Tiwanakuta*. La Paz-Bolivia
- Yampara, Simón (2001). *El Ayllu y la Territorialidad en los Andes: una aproximación a Chambi Grande*, CADA-UPEA, La Paz-Bolivia.

Categorisation of Land Surface Temperature, Built-up, and Vegetation Behaviour at Neighbourhood Scale: Application of Remote Sensing Methods and Cadastral Data

**Karina Angélica García Pardo, Samuel Domínguez Amarillo,
David Manuel Moreno Rangel, José Roberto García Chávez**

ETSA, University of Seville
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, ETSA
Autonomous Metropolitan University -Azcapotzalco UAM, CyAD, Medio
Ambiente, Posgrado en Diseño Bioclimático.
Correos electrónicos: kargarpar@alum.us.es
sdomin@us.es, davidmoreno@us.es, jgc@azc.uam.mx

Abstract

Cities contribution to temperature changes have resulted in the interest to study the factors that influence the increase and decrease of temperatures within these, where the built-up and natural elements play a fundamental role. This study presents a method to identify hot-cold spots at a neighbourhood scale from Land Surface Temperatures (LST), and their significant association with built-up and vegetation characteristics for two seasonal dates (winter and summer). Open access data (cadastral data) and satellite images were used to retrieve the characteristics of interest and LST to further categorise the statistically significant values within these. Results show the general behaviour of each variable, highlighting the importance of integrating built-up and vegetation elements in LST studies. From the identification and categorisation of LSTs hot and cold-spots (over 45% of the neighbourhood's total area), the building heights, building intensity, general vegetation covers, and specific vegetation levels were found to have more significant values (higher and lower than the mean) than the rest of the variables used in the study. The categorisation method and the analyses carried out present a suitable prior study approach that could subsequently lead to detailed assessments related to temperature changes, thermal comfort, provision of regulating ecosystem services, etc.

Keywords: Land Surface Temperature; built-up; urban vegetation; VHR imagery; remote sensing; cadastral data, hot-cold spots.

Abbreviations

<i>LST</i>	Land Surface Temperature
<i>LCZ</i>	Local Climate Zones
<i>GIS</i>	Geographical Information Systems
<i>VI</i>	Vegetation Indices
<i>NDVI</i>	Normalized Difference Vegetation Index
<i>VHR</i>	Very High-Resolution
<i>MSI</i>	Multispectral Imagery
<i>MLST</i>	Mean Local Solar Time
<i>GWR</i>	Geographically Weighted Regression
<i>OBIA</i>	Object-Based Image Analysis
<i>LCC</i>	Land Cover Classification
<i>K</i>	Kappa Coefficient
<i>OA</i>	Overall Accuracy
<i>GSI</i>	Ground Space Index
<i>FSI</i>	Floor Space Index
<i>AvgH</i>	Average Building Height
<i>VCw</i>	Vegetation Cover Winter
<i>VCs</i>	Vegetation Cover Summer
<i>VLC</i>	Vegetation Level Cover (High/Medium/Low)
<i>VCC</i>	Vegetation Cover Change
<i>VLCC</i>	Vegetation Level Cover Change (High/Medium/Low)
<i>LSTw_AM</i>	Land Surface Temperature Winter day time
<i>LSTw_AM</i>	Land Surface Temperature Summer day time
<i>LSTw_PM</i>	Land Surface Temperature Winter night time
<i>LSTw_PM</i>	Land Surface Temperature Summer night time

Introduction

As global temperature changes have been recorded, there has been an increased in the study of the conditions and elements that drive these changes [NOOA, 2023]. In this context, urban environments appear to contribute not only to temperature change on a local scale, but also on larger scales [Kamal-Chaoui *et al.*, 2009]. As a result, studies have been carried out to identify and evaluate factors that influence temperature changes and urban microclimate [Li *et al.*, 2022].

Most of these studies have found a diversity of elements involved, which not only underlie the geographical location but the urban structure, form, composition, and/or the provision or loss of regulating ecosystem services [Bowler *et al.*, 2010; Hoelscher *et al.*, 2016; Kalogeropoulos *et al.*, 2022]. Recent reviews of these studies describe characteristics of built-up and natural elements as factors influencing temperature changes in both air and surface temperatures, as well as other factors that comprise what is defined as the urban microclimate [Kousis *et al.*, 2021].

Notable among the studies that include the assessment of factors influencing urban microclimate is the quantitative classification known as Local Climate Zones (LCZ) developed by Stewart and Oke (2012), which jointly defines characteristics of the built elements, population, and land cover that may be present in urban environments and further condition the local climate.

Other studies have focused on urban growth and expansion, the air and surface urban heat islands, vegetation covers and reflective surfaces to decrease temperatures, heat stress, among others, finding that urban density and anthropogenic heat were important aspects of urban areas, often ignored, as reviewed by Chapman *et al.* (2017).

From the various factors found to contribute to temperature changes in cities, the importance of urban studies that integrate all the influencing factors has been highlighted. However, to carry out this integration, there are complexities related to data collection, data processing, costs and time, and the consideration of changes at the spatio-temporal scale, etc. [Gómez-Baggethun & Barton, 2013; Masson *et al.*, 2020a; Aghamolaei *et al.*, 2022].

As a result, the creation of official datasets of the built-up has emerged [Li *et al.*, 2021], as well as the application of remote sensing tools to observe, classify and assess other features such as natural elements including water bodies, vegetation, etc. [Yu & Fang, 2023], which can be processed all together with Geographic Information Systems (GIS) software.

Official open access databases such as cadastral data has allowed the acquisition of information on the built elements that constitute urban environments in a more efficient way [Noblejas *et al.*, 2022]. On the other hand, the application of remote sensing, which allows earth observation, has had an exponential technological development in terms of spatial, spectral, radiometric, and temporal resolutions [Grove *et*

al., 2006; Chandra Padney *et al.*, 2020]. From this development, its application represents an opportunity compared to ground-based assessments [McGee III *et al.*, 2012; Hostetler *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2016].

In terms of remote sensing applied in urban environments, vegetation cover has been identified, classified, and quantified, vegetation changes have been assessed in terms of spatio-temporal scale, the provision and loss of ecosystem services derived from natural elements have been estimated, socio-economic and vegetation dynamics have been evaluated, Land Surface Temperature (LST) measurements have been acquired, among others [García-Pardo *et al.*, 2022]. Thus, remote sensing applications are key in current comprehensive urban studies where LST and vegetation observations are pertinent [Wang *et al.*, 2023].

Moreover, with the development of algorithms known as Vegetation Indices (VI) it is possible to quantify and qualify vegetation, which has been widely implemented within remote sensing, with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) being the most common [Karnieli *et al.*, 2010]. In terms of acquiring information other than vegetation through remote sensing, LST is used to determine how surface temperature is distributed from the global to the local scale [Cristóbal *et al.*, 2009], which in the case of urban environments is variant, as it is mostly determined by vegetated and water surfaces [Himaya *et al.*, 2018; Guha & Govil, 2020]. Therefore, studies related to urban thermal environment, hydrology, climate change, and forestry, use LST data [Li *et al.*, 2022].

This study aims to categorise areas within an urban neighbourhood with significant values related the object of study (LSTs) and the built-up and vegetation elements, with current available information and tools. In addition, two different seasonal dates corresponding to winter and summer have been considered, as well as two different hours on the same dates (concerning LST measurements). In this way, the present study is intended to contribute to the study and identification of the behaviour of factors that lead to urban surface temperature changes.

Methods and data

2.1. Overview of the methods applied

For this study, we selected the data sources considering the characteristics of interest. The data retrieval of each characteristic entailed a different process detailed in this document (2.3), and subsequently allowed the calculation of the chosen variables. After calculating each variable, analyses were carried out, leading to the identification of hot-cold spots and its categorisation proposed. Figure 1 encompasses the above as the methods applied throughout the study.

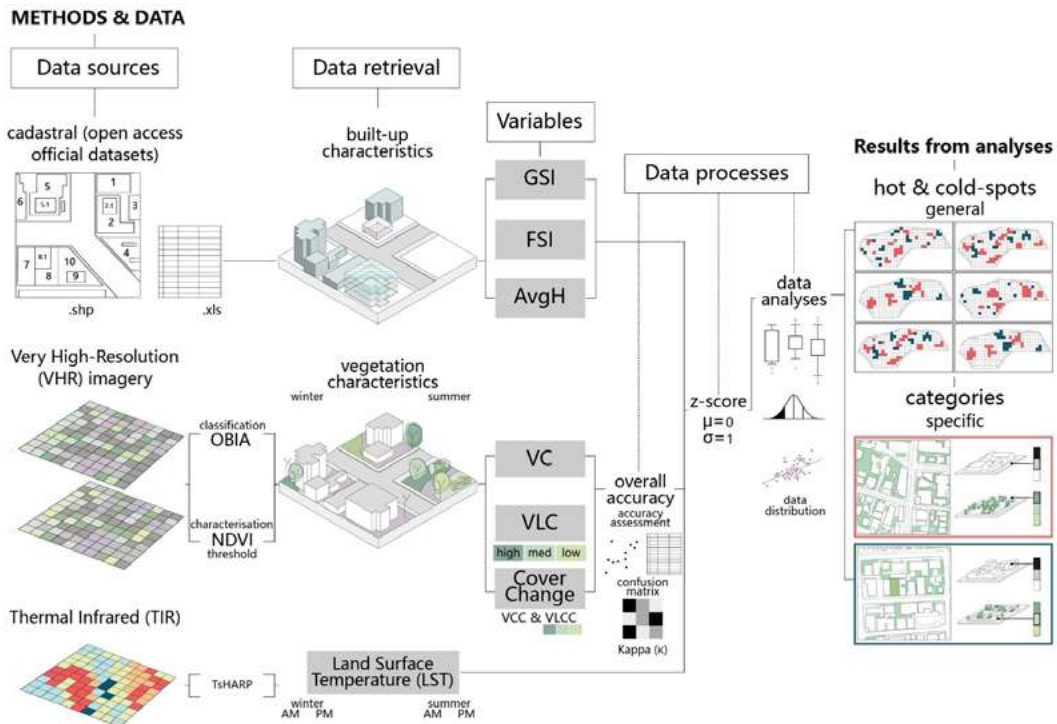


Figure 1. Methods & data applied to the study. **Source:** Own elaboration.

2.2. Study Area

The study was conducted in Canillas, a peripheral neighbourhood – of mixed-use type – within the city of Madrid, capital in Spain, located in the central area of the Iberian Peninsula (latitude: 40°24'59.4" N; longitude: 3°42'9.22" W). Madrid's climate is classified in the Köppen-Geiger (Bsk) as hot summer Mediterranean with hot or very hot and dry summers, and mild wet winters. From the climatological parameters consulted (temperature, radiation, precipitation) we identified that the months of the year with the highest extreme values (diurnal temperature variations) are recorded in January with the lowest temperatures (2°C - 10.5°C) and global radiation (62 kWh/m²), and in July with higher temperatures (17°C - 31.5°C) and global radiation (242 kWh/m²), and lowest precipitation (8mm) throughout the year.

Canillas is in the district of Hortaleza located in the northeast of Madrid, considered part of the peripheral growth of the city when integrated in 1949 [B.O.E., 1949]. The neighbourhood has experienced many urban transitions, from being a formally agricultural town with a small population to have a population increase in the 1930's that led to its division into three districts [Sánchez, 2012]. Currently, it is considered to have an active character due to the sports fields, cycling rings, green areas, and green axis that runs from north to south [Blanco, 2017].

From the revised urban background of Canillas (population growth and urban transitions), we considered it morphologically diverse with a variety of urban layouts and building types. The area of the neighbourhood is 2.52 km², and until the year 2022, it holds a population of 39 708 inhabitants [Ayuntamiento de Madrid, 2022]. The interest in the application of the study in Canillas is based on its potential extrapolation in analogous urban study cases of the southern European, and Mediterranean cities, as well as the several key urban scenarios it presents, such as: the different urban transitions and population growth overtime, and its geographic context (periphery), relative to the main metropolitan area of Madrid.

2.3. Data

The study was conducted using official open access data from the Spanish Cadastre, and 4 Sentinel-3, and 2 Sentinel-2 imagery from the Copernicus Open Access Hub. For the vegetation characteristics 2 very high-resolution (VHR) Pléiades satellite imagery were used and acquired from Airbus DS Geo SGSA. The details of the data sources used, and their characteristics retrieved for the study are shown in table 1.

Along with the use of these data, ArcGIS Pro 2.9.0 y SAGA 8.0.0 software were used as the Geographic Information Systems (GIS) to process each data type. The data for each characteristic was recorded in polygons from the creation of an arbitrary grid based on the boundary of the neighbourhood, resulting in 219 polygons with an equal surface area of 1 ha. The authors considered that the grid and dimensions were suitable for the present study based on a previous review of studies [Zhou *et al.*, 2022; Jiménez-Espada *et al.*, 2022; Noblejas *et al.*, 2022; Rahman *et al.*, 2022], where the grid is the second most applied unit in urban studies and is defined in the study by Liu *et al.* (2021) as a straightforward unit.

2.4. Retrieval of the built-up and vegetation characteristics

For the characteristics of the built-up elements, 3 density variables were selected based on the available information in the Spanish Cadastre databases, including the built area at the subplot level, and the number of storeys per building. In addition, these variables were previously identified in several studies related to urban temperatures and climate [Zhao *et al.*, 2016; Chapman *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2023; Han L. *et al.*, 2023; Han S. *et al.*, 2023].

Subsequently, we selected the vegetation characteristics of interest in the neighbourhood using the 2 Pléiades VHR imagery. As the images had a spatial resolution of 0.50 m x 0.50 m per pixel, it was considered relevant to analyse the vegetation in greater detail, where not only the vegetation cover on the winter and summer representative dates was estimated through the NDVI, but also the vegetation cover was characterized based on its vegetation cover levels in high, medium and low from an

Table 1. Data sources used in the study. **Source:** Own elaboration.

Data Type	Format	Data contained	Source	Characteristics retrieved
Cadastral	Polygons (shapefile) Parcel description document	Cadastral Reference (REFCAT) Building Code (CONSTRU) number of storeys Area of the built elements at subplot level (AREA)	Spanish Cadastre	Built-up 
2 VHR imagery (0.50 m x 0.50 m per pixel)	Raster	Panchromatic Image Multispectral Images (4 bands: Red, Green, Blue & NIR) Dates & time: - January 14, 2022 11:46:59 MLST - July 21, 2021 11:47:11 MLST	Pléiades Satellite_Airbus DS Geo SGSA	Vegetation 
4 Sentinel-3 imagery SL_2_LST (1000 m x 1000 m per pixel)	Raster	Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR) instrument Fractional Vegetation Cover, GlobCover Surface Classification, LST, NDVI and Total Column Water Vapor Dates & time: Day: January 14, 2022 10:26:46 MLST Night: January 14, 2022 21:43:38 MLST Day: July 22, 2021 10:47:55 MLST Night: July 22, 2021 22:07:50 MLST	European Space Agency_Copernicus Open Access Hub	Land Surface Temperature (LST) 
2 Sentinel-2 imagery Level-1C S2MSI1C (10 m x 10m per pixel)		13 spectral bands from MultiSpectral Instrument (MSI): 4 visible bands, 6 Near-Infrared bands, and 3 Short-Wave Infrared bands. Dates & time: January 13, 2022 11:04:21 MLST July 22, 2021 10:56:19 MLST		Downscaling: TsHARP method from NDVI 

NDVI threshold as in [Montandon *et al.*, 2008; Aryal *et al.*, 2022]. Furthermore, the vegetation change between the two dates and vegetation levels was evaluated resulting in 12 vegetation variables.

Two preliminary processes were conducted to obtain the vegetation variables, which included the classification of the surfaces in the neighbourhood from a supervised Object-Based Image Analysis (OBIA) Land Cover Classification (LCC) for each of the 2 VHR imagery identifying 3 cover classes: Impervious, Pervious and Vegetated. Subsequently, the accuracy assessments were carried out to validate the classifications, obtaining Kappa coefficients (K), and overall accuracies (OA) over 85%, showing a substantial strength of agreement based on Rwanda & Ndambuki (2017).

The second process consisted of the characterization of the vegetation cover level applying the NDVI threshold where each pixel contained in the vegetation cover class from the LCC was assigned as high, medium, and low vegetation level. The assignment of each pixel was based on the range of values detailed in table 2.

The selected built-up and vegetation variables are shown in table 2 including their corresponding calculation formulas that were applied to each of the polygons within the previously created grid.

Table 2. Selected built-up and vegetation variables. **Source:** Own elaboration.

Characteristics	Variables (abbreviated)	Formula		Description
Built-up	Ground Space Index (GSI)	$GSI = \frac{\sum_{k=1}^n Bf}{Ta}$	(1)	Area occupied by buildings within the study area (polygon).
	Floor Space Index (FSI)	$FSI = \frac{\sum_{k=1}^n (F)}{Ta}$	(2)	Building intensity from the total amount of enclosed area of all storeys within each building.
	Average Building Height (AvgH)	$AvgH = \frac{\sum_{k=1}^n (Bs * 3.00 m)}{No. buildings}$	(3)	Mean building height.
Vegetation	Preliminary process: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$	(4)	Ratio-based Vegetation index to identify vegetated and non-vegetated surfaces.
	Vegetation Cover (VC)	$VC = \frac{\sum_{n=1}^{Vc} * 100}{Ta}$	(5)	Percentage of area occupied by vegetation on winter and/or summer dates over the study area.
	Vegetation Level Cover (VLC) high/medium/low	$VLC (H/M/L) = \frac{\sum_{n=1}^{Cp} * 100}{Tp}$	(6)	The values for this characterisation were: - Vegetation Level Cover High (VLCH) from +0.50 to +1 - Vegetation Level Cover Medium (VLCM) from +0.19 to -0.49 - Vegetation Level Cover Low (VLCL) <0.19.
	Vegetation Cover Change (VCC)	$VCC = (VC_{summer} - VC_{winter})$	(7)	Difference in VC between the 2 representative dates for winter and summer.
	Vegetation Level Cover Change (VLCC)	$VLCC = (VLC_{summer} - VLC_{winter})$	(8)	Difference in VLC between the 2 representative dates for winter and summer.

Note: is the total study area (1 ha); represents the building; are the buildings' footprints; F is the building's total gross floor area; Bs are the number of storeys; 3.00 m is a standard value assigned for all buildings above floor level. and are the spectral bands in the VHR Pléiades imagery; are the polygons corresponding to the vegetation class from the supervised OBIA LCC; is the pixel characterised with a NDVI threshold vegetation level; and is the total number of pixels within the polygon (40 000).

2.5. Land Surface Temperature (LST) retrieval

Land surface temperatures (LST) in this study included 4 satellite imagery derived from ground pixel level observation obtained from Sentinel 3_SL_2_LST at a spatial resolution of 1000 m x 1000 m per pixel. The imagery corresponds to daytime and night-time hours (Mean Local Solar Time, MLST) in two representative dates for winter (January 14, 2022) and summer (July 22, 2021).

As the original spatial resolution of the imagery is coarse for this case study, we applied the TsHARP method using the NDVI raster derived from the Sentinel 2_1LC_MSI product bands (10 m x 10 m per pixel,) and processed these in SAGA 8.0.0 software. The TsHARP method is commonly used in urban studies [Sattari *et al.*, 2022; García & Díaz, 2023], which allows to downscale coarse imagery with a Geographically Weighted Regression (GWR), resulting in 4 LST imagery at a resolution of 10 m x 10 m per pixel (see figure 2).

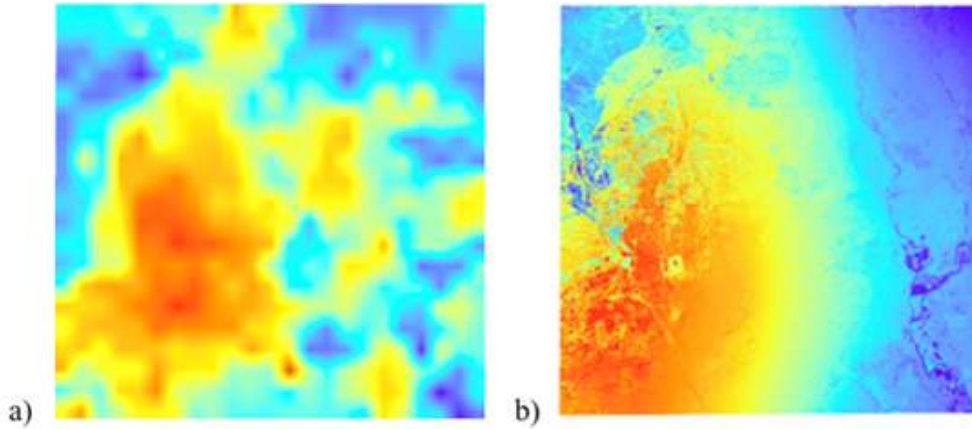


Figure 2. Land Surface Temperature (LST) summer representative date in night-time maps: a) shows the coarse Sentinel 3_SL_2_LST at a spatial resolution of 1000 m x 1000 m per pixel, b) shows the result after the TsHARP method was applied, with a spatial resolution of 10 m x 10 m pixel.

Source: Own elaboration.

Once the images were obtained at the selected spatial resolution, we proceeded to obtain the mean LST values per polygon through a statistical analysis by zone, having a total of 4 LST variables: LST Winter Day (LSTw_AM), LST Winter Night (LSTw_PM), LST Summer Day (LSTs_AM), and LST Summer Night (LSTs_PM).

2.6. Analyses and categorisation of variables

The analyses proposed for the variables included in this study aimed to: i) observe the distribution and behaviour of each variable in the neighbourhood, and ii) identify the outliers, hot-spots and cold-spots within the neighbourhood. Based on the analyses, the hot-cold spots were categorised to allow a comprehensive understanding of the built-up and vegetation characteristics associated with the retrieved LST variables.

Prior to the analyses described below, each of the 19 variables calculated in the polygons within the neighbourhood were standardised (z-score) given the difference in units of these variables.

For the first analysis, scatter plots and box plots were generated to visualise the distribution, interquartile range, median values, and extreme values (outliers) for each of the variables. Through these graphical visualisations, the change in the values of each variable measured in the neighbourhood was displayed, allowing an insight and comparisons of their behaviour within the neighbourhood.

Statistically significant values (hot-cold spots) were identified by the Optimized Hot Spot Analysis tool in ArcGIS Pro 2.9.0 software. From this tool maps with statistically significant high values (hot-spots) and low values (cold-spots) are shown, and a new output feature class is displayed with values specified as statistically significant at: 99% confidence level (± 3), 95% confidence level (± 2), 90% confidence level (± 1), and the non-statistically significant (0). The statistics Getis-Ord G_i^* is used in this tool also to measure the local spatial autocorrelation for each input data and can also identify different clustering patterns [Abdulhafedh, 2017].

The analyses carried out allow us to know the general behaviour of each variable in the neighbourhood, leading to a preliminary evaluation of the situation in the neighbourhood according to the variable of interest. However, this observation does not allow the integration of all the variables, therefore in this study we proposed a categorisation of the variables based on the hot and cold-spots (different from the mean values of the neighbourhood) to identify the existence of patterns from the built-up and vegetation characteristics that lead to significant values in the 4 LST variables measured.

For this purpose, the values from the feature class created with the Optimized Hot Spots Analysis tool were recorded, which varied from 0 to ± 3 in each of the polygons. Polygons with variable values of 0 were categorised within the mean values of the neighbourhood and values different from 0 were categorised as hot and cold-spots according to their level (± 1 to ± 3). By doing so, a consistent interpretation of each polygon was sought to identify those possible relations and characteristics that lead to statistically significant results in LST. In this study, LST data were selected as the object of study to be compared with built-up and vegetation variables, however, the categorisation is intended to be used to compare other variables with each other, depending on the study purpose.

Results

3.1. General behaviour in the neighbourhood from data distribution analyses

For the overall behaviour of each variable in the neighbourhood, following the observation of the distribution of the data, we focused on the interquartile range, the upper and lower quartiles, and the outliers. As a result, we found that for the 3 built-up variables, AvgH was the variable with the wider interquartile range and GSI was the one with the shortest. We found that there are greater variations in building heights in the neighbourhood than in building intensity and occupancy, but there are no polygons that contain significantly different heights from the general minimum and maximum heights.

From the vegetation cover variables, we observed that for both the general vegetation cover in winter and summer (VCw and VCs), there is a similar interquartile variation and distribution of values above and below the median, and no outliers were identified for any of the variables. This showed that there is similar vegetation cover evolution between cold-hot season within the neighbourhood.

From the 6 vegetation level cover variables we found a greater variation and distribution of the data in comparison with the aforementioned variables. Among this group of variables, the VLCsM parameter show the greater dispersion in the area, but with no extreme values. The variable VLCsL had the most homogeneous behaviour among some cells with extreme figures that show outliers. Regarding the information from these vegetation cover levels, we understand there is a mean equivalent distribution of low level vegetation, but also the existence of specific areas with higher low vegetation cover in the neighbourhood during the hot season.

A heterogeneous distribution in the vegetation surface based on the level of vegetation covers within the neighbourhood was distinguished. Furthermore, when comparing the variables for each representative date we observed the possibility of the existence of biological changes in the vegetation according to the seasons (perennial or deciduous) as none of the high, medium, and low levels showed a constant or similar behaviour.

There is a notable variation in the distribution of the data as in the vegetation level variables for the vegetation cover change variables, with the tighter concentration is in VLCCM value, indicating lower sensibility to inter-seasonal change in the intermediate vegetation level. These variables have extreme cell-values —outliers— in both upper quartile and lower quartile directions. Therefore, we found that there are areas in the neighbourhood that show significant increases and decreases between the two dates that are different from the mean changes within the neighbourhood.

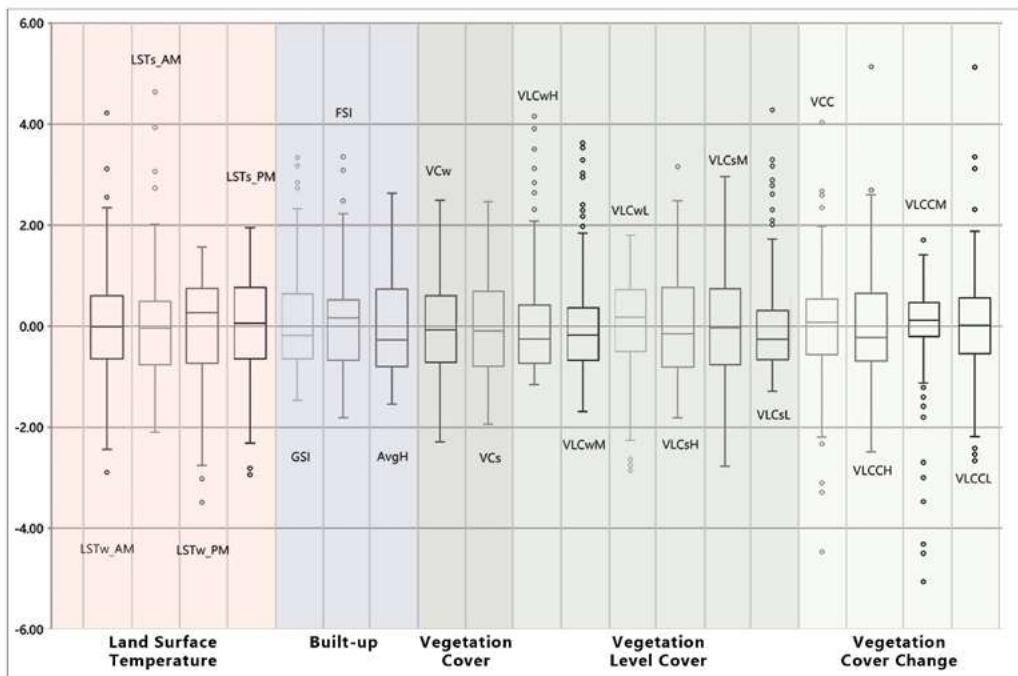


Figure 3. Box plots of 19 standardised (z-score) variables assessed in the study.

Source: Own elaboration.

Regarding the 4 LST variables, greater data variation was observed in the LSTw_AM variable than in the rest, also showing a similar data variation as in the vegetation cover for winter (VCw). We identified outliers in all 4 variables, where those in the daytime (AM) were above the upper quartile and those in the nighttime (PM) were below the lower quartile. The LSTw_PM variable showed most values below the mean, indicating that in the neighbourhood there are more areas with below-average temperatures at night in winter, that could lead to cool island effects if the areas correspond to the areas with upper outliers shown in high and medium vegetation level covers in winter.

Figure 3 shows the corresponding box plots for the 19 variables altogether where the differences between the distributions, interquartile ranges, and outliers for each variable can be distinguished.

3.2. Statistically significant values (hot and cold-spots) identified from variables

Based on the results obtained from the Optimized Hot Spot Analysis to identify statistically significant values, we found that the variable AvgH is the variable with the lowest number of polygons within the not significant values and the highest number of polygons corresponding to hot and cold-spots compared to all the variables evaluated.

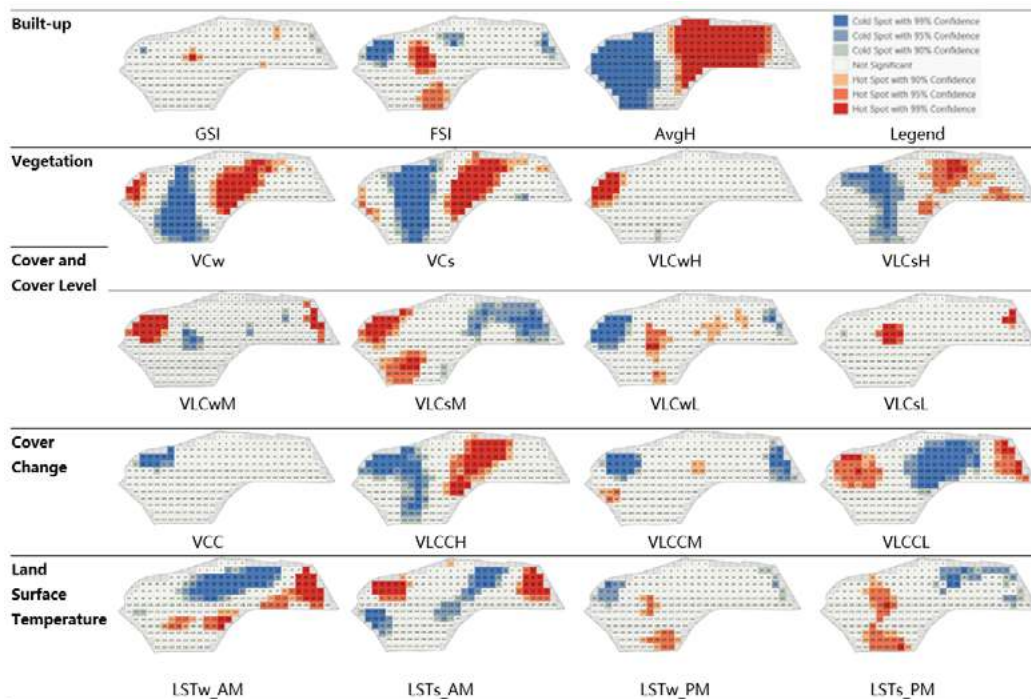
Furthermore, we observe that even with the variation of statistically significant values of AvgH, there is a distinctive clustering of these values in the neighbourhood that is not present in the rest of the variables. The GSI variable contains the highest number of polygons within the not significant values compared to the rest of the variables. From the results obtained for the built-up variables, we find that building heights have a clearer distinction compared to the building intensity and occupancy.

Table 3 shows the results from the Optimized Hot Spot Analysis tool for each of the 19 variables where the statistically significant values are determined by a colour scheme.

The general vegetation cover variables showed a close number of polygons belonging to hot and cold-spots, consistent with the analysis in the previous section (4.1.). The spatial distribution of these variables indicates that the vegetation cover on both dates is above and below the mean in the same areas of the neighbourhood, is worth to consider when analysing jointly with LSTs variables for each date, to identify possible relationships with cold-hot spots in surface temperatures in those areas.

A greater variation of statistically significant polygons is observed for the 6 variables of vegetation level cover. Comparing the spatial distribution by level and date, we found that between VLCwH and VLCsH, there is a greater difference in the not significant values than in the rest, as well as in their spatial distribution. In VLCsH there is a more heterogeneous coverage distribution, showing larger areas with polygons in hot and cold-spots than in VLCwH. These findings can guide to the identification of links between areas with surface temperature increases or reductions and areas with hot-cold spots in these vegetation cover levels, considering that this level corresponds to trees that can provide shade during the day.

Table 3. Optimized Hot Spot Analysis results for 19 variables. **Source:** Own elaboration.



Between VLCwM and VLCsM there is a set of polygons that remains as hot-spots, and a larger area of polygons in cold-spots in VLCsM. These constant areas identified with above the average medium vegetation level cover are also identified within the LSTs hot-cold spots (LSTs_AM and LSTw_PM), showing higher surface temperatures for the hot season daytime and lower surface temperatures for the cold season night time. Comparing VLCwL and VLCsL the not significant values are more similar to each other among the rest of the vegetation level variables, but in VLCwL there are polygons in cold-spots not identified in VLCsL.

According to the 4 variables of general vegetation cover change and vegetation cover change by level, not significant values were found to be higher in VCC than in the rest, meaning that the change in general vegetation cover between dates is more homogeneous between polygons. The only significant values (cold-spots) found in VCC correspond to areas identified in the 3 vegetation level covers, and represent a decrease in vegetation cover from the winter to the summer date.

When comparing the changes in vegetation levels it was found that the spatial distribution within the VLCCH and VLCCL hot-spots and cold-spots is inverse. Thus, indicating that when there is an increase in high level vegetation between winter and summer in these polygons, low level vegetation decreases, and inversely. VLCCM had a greater number of not significant polygons than VLCCH and VLCCL. Observing the medium vegetation level cover change we find interesting that the same constant hot-spots areas show a decrease between the two dates, meaning that the average medium vegetation cover level in the neighbourhood could be significantly low in winter.

From the comparison of the results of the 4 LST variables, we found that there are more not significant polygons in LSTw_PM and fewer in LSTw_AM. Therefore, there is a higher heterogeneous distribution of surface temperatures in the daytime for winter than in the rest of the variables. We understand that the results showing a greater variation for the daytime LSTs than for those in the night time are linked to the presence of solar radiation.

More hot-spots were detected in LSTw_AM and in LSTs_AM, distributed differently, where we observe similarities in certain areas concerning low and medium level vegetation covers. Between LSTw_AM and LSTs_AM as well as between LSTw_PM and LSTs_PM we observed an area with similar hot-spot polygons.

3.3. Categorisation and identification of hot-cold spots in built-up and vegetation variables related to LSTs

Following the categorisation of each of the polygons in the range of 0 to ± 3 values for all variables, polygons with values ± 1 to ± 3 (90% to 99% confidence hot and cold-spots) were selected for the 4 LST variables aiming to identify those built-up and vegetation with higher or lower than the mean values.

From the categories in hot-spots (+1 to +3) for all LSTs, we found that the total number of polygons recorded within these categories is less than 44% of the total polygons in the neighbourhood. Regarding the analysis of the polygons corresponding to the categories in cold-spots (-1 to -3) for all LSTs, we found that the total number of polygons recorded within these categories is less than 47% of the total polygons in the neighbourhood.

The polygons categorised into hot-cold spots from the Optimised Hot Spot Analysis represent ranges of larger and smaller values compared to the expected value of each normalised distribution of the LST data, which means that they are not corresponding to the outliers (extreme values) of each of the distributions, but they differ from the mean (not significant) values in the neighbourhood.

3.3.1. Categories within LSTs hot-spots

From the selection of the hot-spots polygons in LST (categories +1 to +3), each built-up and vegetation variable were observed to identify if these were higher, lower or in the mean range of their data distribution. The variables with more general higher values were VLCCL, FSI, and VLCsM and those with the least were VLCCM, GSI, VCC and VLCwM. The variables with more general lower values were VLCsH, VLCCM, and VCs and those with less were VLCsL, VLCwH, VLCCL, GSI, and FSI.

We identified the variables that influence the most in these LSTs categories, shown to be more related to vegetation covers in the medium and low level, ground occupancy, and building intensity. However, these variables result from the general observation

and count within the categories, and therefore the 4 LSTs hot-spots were analysed separately to find the built-up and vegetation variables that present different values from the neighbourhood average (higher and lower values), considering the different conditions for each date and hour.

In LSTw_AM the built-up and vegetation variables show more higher than the average values. The variables with higher values were AvgH and VLCCL, and with lower values was VCw. Therefore, the LSTw_AM hot-spots show values different from the mean related to the height of the buildings, low vegetation level cover, and general vegetation cover in winter.

For LSTw_PM the built-up and vegetation variables show more lower than the average values. The variable with higher values was FSI, and the variable with lower values was VCw. By this, we found that LSTw_PM hot-spots show values different from the mean related to building intensity and general vegetation cover in winter, over the other variables measured.

In LSTs_AM the built-up and vegetation variables show more values higher than the average values. The variables with higher values were VLCCL, VLCsM, and AvgH, and the variable that presented lower values was VLCCM. Therefore, the LSTs_AM hot-spots show values different from the mean related to low and medium vegetation level covers in summer, heights of the buildings, and a decrease of medium vegetation cover level from winter to summer.

Finally, in LSTs_PM the built-up and vegetation show more lower than the average values. The variable that presented higher values was FSI, and the variable with lower values was VCS. Based on the above, LSTs_PM hot-spots show values different from the neighbourhood's mean related to building intensity and vegetation covers in summer.

By analysing each of the LSTs independently, we found how the general observations presented at the beginning of this section differ, identifying the importance of observing each of these variables in detail and separately. From these results, we observe that in the LSTs corresponding to the daytime, there is a coincidence in the variables with values that differ from the neighbourhood's mean related to the heights of the buildings and the low and medium vegetation cover levels. However, for the LSTs corresponding to the night time, there is a coincidence in the variables related to building intensity and general vegetation covers.

3.3.2. Categories within LSTs cold-spots

From the selection of the cold-spots polygons in LST (categories -1 to -3), each built-up and vegetation variables were observed as in section 3.3.1. The variables with more general higher values were AvgH and VCs, and those with the least were VCC and GSI. The variables with more general lower values were VLCCL, VLCsM, AvgH and FSI, and those with less were VLCwH and VCC.

We identified the variables that most influence these LSTs categories being related to building heights, general vegetation cover in summer, medium vegetation level covers in winter and summer, vegetation low level cover change, and building intensity. Subsequently, the 4 LSTs cold-spots were analysed separately as it was done for the hot-spot categories to find the built-up and vegetation variables that present values different from the neighbourhood's mean (higher and lower values).

In LSTw_AM the built-up and vegetation variables show more values higher than the average values. The variable with higher values was AvgH, and the variable with lower values was VLCCL. Accordingly, LSTw_AM cold-spots show values different from the neighbourhood's mean related to the height of the buildings, and the increase in low level vegetation cover between winter and summer.

In LSTw_PM the built-up and vegetation variables show more values higher than the average values. The variable that presented higher values was VLCwM, and with the variables with lower values was FSI. Therefore, LSTw_PM cold-spots show values different from the mean related to the building intensity and the medium vegetation level cover in winter.

In LSTs_AM the built-up and vegetation variables show lower than the average values. The variables that presented higher values were AvgH, VCs, and VLCCH, and the variables lower values were VLCsM and VLCCL. On this basis, LSTs_AM cold-spots show values different from the neighbourhood's mean related to the height of the buildings, the general vegetation cover in summer, the increase of high vegetation level cover from winter to summer, medium vegetation level cover, and the decrease of low vegetation cover from winter to summer.

Finally, for LSTs_PM the built-up and vegetation variables show more values higher than the average values. The variables that presented higher values were AvgH and VCs, and the variables with lower values were VLCsM and VLCCL. Accordingly, the LSTs_PM cold-spots show values different from the neighbourhood's mean related to the height of buildings, general vegetation cover in summer, medium vegetation level cover, and the decrease of low vegetation cover from winter to summer.

From these results, we observe that the cold-spot categories in LSTs include variables with values that differ from the neighbourhood's mean related to the height of buildings and building intensity. We observed a difference between the influence of vegetation cover levels and vegetation cover change compared to the LSTs in hot-spot categories, which indicates that it would not be sufficient to study only the general vegetation covers but also the vegetation levels and the changes between these two dates.

Discussion

4.1. Data distribution and hot-cold spots to understand behaviour at neighbourhood scale

Following the results obtained in the distribution of the values from the variables to identify the general behaviour of the neighbourhood, it was possible to see the variation in the values where we noted greater distribution of building heights (AvgH), and vegetation level covers (VLCH/M/L). Within these vegetation level covers, the medium level cover in summer (VLCsM) had the most variation as opposed to the low level cover (VLCsL). This highlights the importance in considering vegetation cover levels beyond just the general vegetation covers but from their performance, which for this study was done by characterising the levels through the NDVI threshold.

The spatial analysis of significant values by variable in the neighbourhood shows that building heights (AvgH) has a wider variation compared to the neighbourhood mean and is clustered in specific areas of the neighbourhood, possibly linked to the land use, building typologies, urban planning, the activities developed within the neighbourhood, among others.

Concerning the vegetation variables, we found that in the high level vegetation covers in winter and summer there is a greater difference in the spatial distribution of the significant values, which indicate that the vegetation at this level could present biological changes possible to detect in the satellite images and these differ by areas and seasons in the neighbourhood. In this way, it is easier to understand the dynamics associated with this level of vegetation, such as the contribution or loss of certain ecosystem services in different areas and at different periods throughout the year.

The distribution of hot and cold spots for the measured LSTs variables shows that when analyzing daytime hours (LSTw_AM and LSTs_AM) the hot-spots show a greater standardized distance to mean than those nocturnal –lower dispersion for extreme values– (LSTw_PM and LSTs_PM). Through the observation of the data in the areas within the hot-cold spots and outliers, it can be possible to detect urban heat or cool islands related to the fact that in the daytime values were observed above the upper quartile indicating the possibility of urban heat islands in summer and vice versa as in the evening values were recorded at lower outliers that could lead to the existence of urban cold islands.

Figure 4 shows a bar chart where the number of polygons corresponding to statistically significant and not significant values were quantified. This graph allowed a comprehensive reading of the results of the Optimized Hot Spot Analysis and provided the insights explained previously regarding the 19 variables studied.

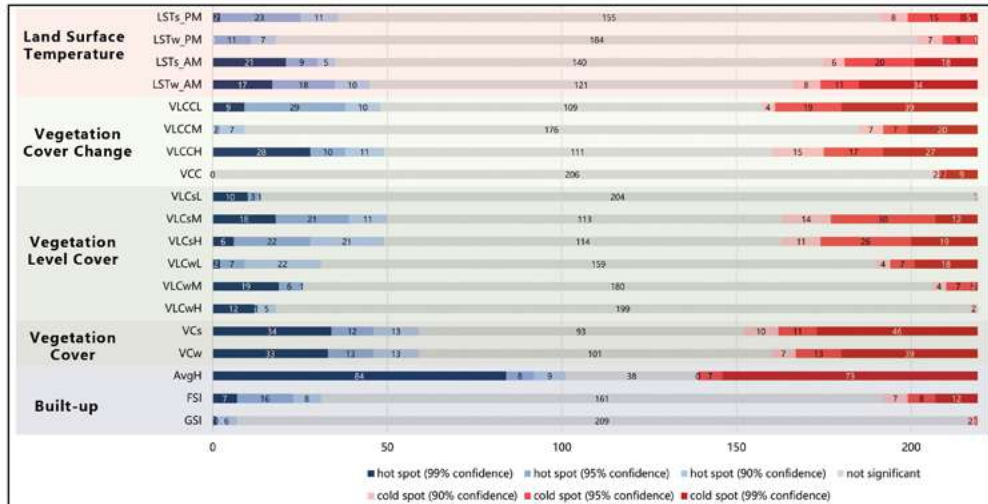


Figure 4. Bar chart of Optimized Hot Spot Analysis results for the 19 variables assessed in the study. Source: Own elaboration.

4.2. Identification of built-up and vegetation relationships from hot-cold spot ranges in LSTs

In this study, the LSTs were used as the research subjects as a proxy variable, to analyse the possible relationships between the built-up and vegetation variables that showed higher and lower than the neighbourhood's mean values.

As polygons within the hot and cold-spots in LSTs were selected, their values within the built-up and vegetation variables were observed to identify similarities or differences within them, considering higher and lower from the neighbourhood's mean values to find and understand possible relationships within the variables for each LST.

Figure 5 shows a sample of 2 randomly selected polygons within the hot-cold spots in 2 LSTs variables containing the information derived from the method. This enables to asset the behaviour of the built-up and vegetation variables in each polygon. A more detailed assessment could be carried out regarding the provision of ecosystem services, outdoor thermal comfort, composition of built-up vs. vegetated elements, etc. when observing all the variables and their values categorised.

Associated with the general results for LSTs hot-spots, we found a higher presence of higher and lower than the neighbourhood's mean values in building height (AvgH), building intensity (FSI), general vegetation cover (VCw and VCs), and in medium and low level vegetation covers in winter and in summer (VLCsM, VLCwL, and VLCsM).

For the general results of LSTs cold-spots, on the other hand, we saw greater presence of neighbourhood's mean values in building height (AvgH), building intensity (FSI), general vegetation cover in summer (VCs), medium level vegetation covers in winter and in summer (VLCwM and VLCsM), and high and low vegetation cover changes (VLCCH and VLCCL).

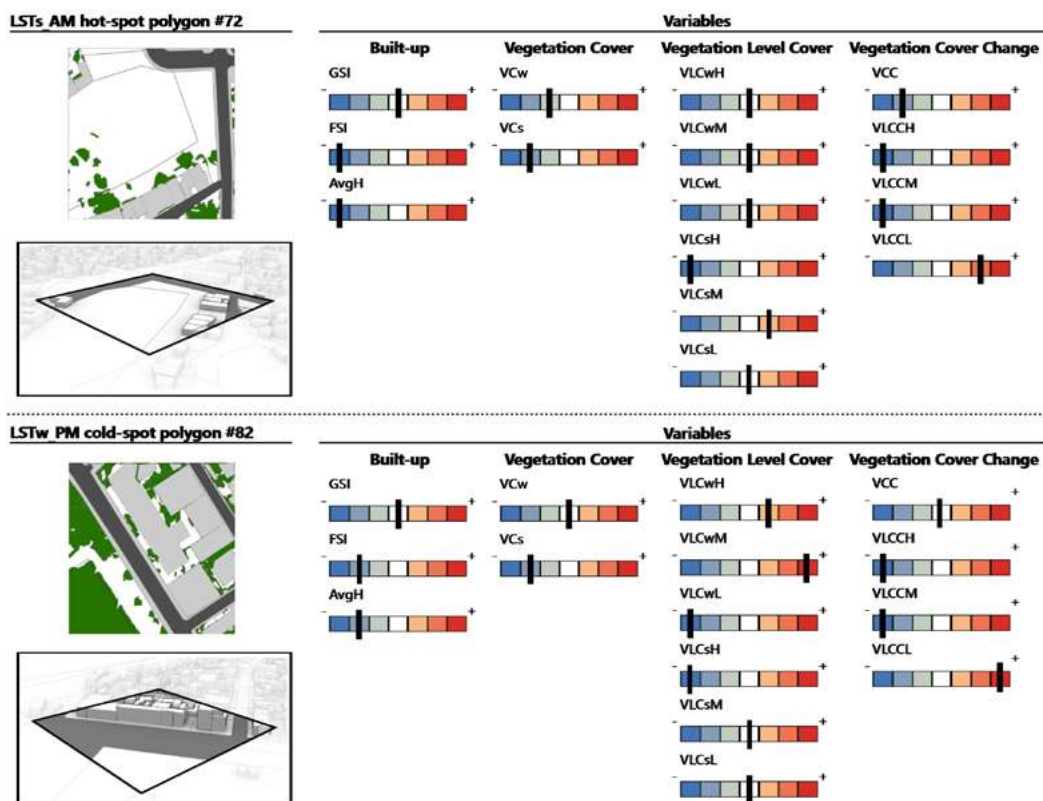


Figure 5. Sample of 2 polygons with significant LSTs values and display of built-up and vegetation variables: top) polygon with hot-spot values in LSTs_AM, and bottom) polygon with cold-spot values in LSTw_PM. **Source:** Own elaboration.

4.3. Applications from the categorisation of hot-cold spots

The method for carrying out the categorisation in this study consisted of data acquisition, the registration of the data in a neighbourhood measurement unit (grid), the standardisation of the data by variables, the analysis of the data distribution, the spatial analysis of significant values by variables, and finally, the designation of categories by upper and lower values in each one of the polygons and per variable to observe possible relationships of variables related to the 4 LSTs variables.

The categorisation presented here allows to have the same range of values to compare the polygons and each of the variables measured in them, based on values above or lower than the expected values from the data distribution identified as areas with hot-cold spots. Through this first identification it was possible to have a prior knowledge of what is happening at the neighbourhood scale, based on the built-up and vegetation characteristics, and land surface temperature data.

Conclusions

The study developed here sought to contribute to the analysis of urban environments and their possible relationships with elements present within these and variations in urban surface temperatures.

Through the data retrieval processes and the characteristics possible to calculate in this study, the use of open access data sources and VHR imagery is highly recommended for the efficiency they represent in terms of time efficiency compared to ground-based measurements. In terms of costs, it is important to stress that open access to VHR imagery can be limited but was shown to be particularly useful in this study as it was found by the relationships between variables referring to vegetation level covers and LST variables.

In both cases, the use of official data and remote sensing techniques clearly shows the technological development, variety, and availability of these currently present as well as their contribution to the study of urban environments.

According to the results obtained, it was possible to see how each of the variables measured behaved, from the general point of view of the neighbourhood to a more particular point comprising the grid generated. These behaviours indicated the prominent role of average building heights (AvgH) over the other measured variables of the built-up (FSI and GSI) in the neighbourhood.

On the other hand, the observation of the data on the measured vegetation variables indicated the importance of detailed vegetation assessment, which not only considers the general vegetation covers in the two periods, but also how this is distributed between different vegetation levels, which in the case of the neighbourhood showed a significant variation of the medium vegetation level cover in winter and in summer, compared to the other levels.

In addition, a heterogeneous distribution of vegetation level covers was distinguished in the neighbourhood that changes for the two dates, pointing to the possibility of interesting biological plant changes in studies that focus on phenology, provision of distinct classes of ecosystem services, etc. By observing the role of vegetation cover and the detailed measurement of its levels of vegetation cover, the authors stress the importance of using very high resolution (VHR) satellite imagery as identified in other studies reviewed in [García-Pardo *et al.*, 2022].

Regarding the selection of LST as an object of study, we support the interest in identifying significant values both to detect areas within a case study where there are important changes, as well as to see the relationships they have with the elements of the urban environment. Identifying variables with a stronger relationship allows us to prioritise some features of the built environment and vegetation over others.

The authors believe relevant to consider not only a specific time in the study of LST, since the results showed important variations between day and night for the same date, this being useful for the evaluation of energy accumulation, urban outdoor

thermal comfort, urban heat, or cold islands, etc. Regarding the acquisition of LSTs by means of satellite images, the authors recognise the advantages that these provide, and the processes developed to improve their resolutions which have been applied in various studies, showing relevant results on the urban heat island effect [Noblejas *et al.*, 2022; Sattari *et al.*, 2022; García & Díaz, 2023].

Apart from detecting the significant values of each variable, the categorisation method can be extrapolated to other urban environments, because it does not include the specific qualification of each area of the neighbourhood (polygon), but rather the observation of the average, the above, and below average behaviours in the neighbourhood. Following this observation, it is possible to develop more detailed studies of the areas and their values in each variable to be qualified based on a specific condition studied, whether it is related to temperature changes, as well as energy accumulation, distribution, and availability of vegetation, provision, or loss of regulating ecosystem services, etc.

Acknowledgements

This research was funded by CONACYT-CULTURA Foreign Scholarships in Mexico (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - Fondo Nacional para la Cultura y las Artes es un organismo público del gobierno federal mexicano, adscrito al Consejo Nacional para la Cultura y las Artes), and the satellite imagery was funded through the TEP 130 Research Group (Arquitectura, Patrimonio y Sostenibilidad: Acústica, Iluminación y Energía).

The Pléiades imagery used were obtained from © CNES (2022), Distribution Airbus DS Geo SA under an Academic License Agreement.

Author Contributions

Conceptualization, G.P.K.A.; Methodology, G.P.K.A., D.A.S. and M.R.D.; Software, G.P.K.A.; Validation, G.P.K.A.; Formal analysis, G.P.K.A., D.A.S. and M.R.D.; Investigation, G.P.K.A., D.A.S., M.R.D and G.C.J.R.; Resources, G.P.K.A. and G.C.J.R.; Data curation, G.P.K.A.; Writing—original draft preparation, G.P.K.A.; Writing—review and editing, G.P.K.A., D.A.S. and M.R.D; Visualization, G.P.K.A.; Supervision, D.A.S., M.R.D and G.C.J.R.; Funding acquisition, D.A.S. and M.R.D. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

References

- Abdulhafedh A. (2017). A Novel Hybrid Method for Measuring the Spatial Autocorrelation of Vehicular Crashes: Combining Moran's Index and Getis-Ord G_i^* Statistic. *Open Journal of Civil Engineering*. Vol 7, no. 2. [10.4236/ojce.2017.72013](https://doi.org/10.4236/ojce.2017.72013)
- Aghamolaei, R., Azizi, M. M., Aminzadeh, B., O'Donnell, J. (2022). A comprehensive review of outdoor thermal comfort in urban areas: Effective parameters and approaches. *Energy & Environment*, 0(0). <https://doi.org/10.1177/0958305X221116176>
- Aryal, J., Sitaula, C., Aryal, S., (2022). NDVI Threshold-Based Urban Green Space Mapping from Sentinel-2A at the Local Governmental Area (LGA) Level of Victoria, Australia. *Land*. 11 (3), 351. <https://doi.org/10.3390/land11030351>
- Ayuntamiento de Madrid. Distrito en cifras (Información de Barrios). 1 January 2022). Retrieved from: <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Estadistica/Areas-de-informacion-estadistica/Economia/Distritos-en-cifras-Informacion-de-Barrios/> [Accessed August 18, 2022].
- Blanco O. E. (2017). Madrid – Distrito 16 Hortaleza. “otro punto” de vista sobre el territorio. Retrieved from: <https://eblancooliva.com/2017/04/27/madrid-distrito-16-hortaleza/> [Accessed January 10, 2020].
- Boletín Oficial del Estado. (1949). DECRETO de 17 de agosto de 1949 por el que se aprueba la anexión total del término municipal de Canillas al de Madrid. B. O. del E.—Núm. 319. Retrieved from: <https://www.boe.es/da-tos/pdfs/BOE/1949/319/A04782-04782.pdf> [Accessed January 10, 2020].
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., y Pullin, A. S., (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*. Vol. 97. pp. 147-155.
- Chandra Padney, P., Balzter, H., Srivastava, K., P. P., Petropoulos, G., Bhattacharya, B., (2020). 21 – Future perspectives and challenges in hyperspectral remote sensing. *Hyperspectral Remote Sens.* 429–439.
- Chapman S., Watson J. E. M., Salazar A., Thatcher M., McAlpine C. A. (2017). The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landscape Ecology*, 32, 1921-1935. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- Chen Y., Yang J., Yu W., Ren J., Xiao X., Xia J. C. (2023). Relationship between urban spatial form and seasonal land surface temperature under different grid scales. *Sustainable Cities and Society*. Vol 89, 104374. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104374>

- Cristóbal J. J.C., Jiménez-Muñoz J. A., Sobrino M., Ninyerola X., Pons. (2009). Improvements in land surface temperature retrieval from the Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *J. Geophys. Res.*, 114, D08103, doi:10.1029/2008JD010616
- García, D.H., Díaz, J.A. (2023). Space-time analysis of the earth's surface temperature, surface urban heat island and urban hotspot: relationships with variation of the thermal field in Andalusia (Spain). *Urban Ecosyst.* <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01321-9>
- García-Pardo, K. A., Moreno-Rangel, D., Domínguez-Amarillo, S., García-Chávez, J. R., (2022). Remote sensing for the assessment of ecosystem services provided by urban vegetation: A review of the methods applied. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127636. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127636>
- Gómez-Baggethun, E., Barton, D. N., (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*. Vol 86, 235-245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- Grove, M., Cadenasso, M.L., Burch Jr, W.R., A Prickett, S.T., Schwarz, K., Wilson, M., Troy, A., Boone, C., Jr, B., (2006). Data and methods comparing social structure and vegetation structure of urban neighborhoods in Baltimore, Maryland. *Soc. Nat. Resour.* 19 (2), 117–136.
- Guha S., Govil H. (2020). An assessment on the relationship between land surface temperature and normalized difference vegetation index. *Environ Dev Sustain.* <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00657-6>
- Han L., Lu L., Fu P., Ren C., Cai M., Li Q. (2023). Exploring the seasonality of Surface urban heat islands using enhanced land surface temperature in a semi-arid city. *Urban Climate*. Vol 49, 101455. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101455>
- Han S., Hou H., Estoque R. C., Zheng Y., Shen C., Murayama Y., Pan J., Wang B., Hu T. (2023). Seasonal effects of urban morphology on land Surface temperature in a three-dimensional perspective: A case study in Hangzhou, China. *Building and Environment*. Vol 228, 109913. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109913>
- Himaya, S., Ismail A., Nandi, Ridwana R., Arrasyid R., Affriani A. R., Ihsan M. (2018). Correlation between Land Surface Temperature and Vegetation Greenness using Multi-temporal Images. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 286 012043. doi:10.1088/1755-1315/286/1/012043
- Hoelscher, Marie-Therese; Nehls, Thomas; Jänicke, Britta y Wessolek, Gerd. (2016). Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047
- Hostetler A. E., Rogan J., Martin D., Delauer V., O'Neil-Dunee J. (2013). Characterizing tree canopy loss using multi-source GIS data in Central Massachusetts, USA. *Remote Sens. Lett.*, 4 (12) (2013), pp. 1137-1146. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.852704>

- Huang, C.D., Ye, X.Y., Deng, C.B., Zhang, Z.L., Wan, Z., (2016). Mapping above-ground biomass by integrating optical and SAR imagery: a case study of Xixi National Wetland Park, China. *Remote Sensing*. 8, 647.
- Jiménez-Espada, M., Manuel Martínez García, F., González-Escobar, R. (2022). Urban Equity as a Challenge for the Southern Europe Historic Cities: Sustainability-Urban Morphology Interrelation through GIS Tools. *Land*. 11, no. 11: 1929. <https://doi.org/10.3390/land11111929>
- Kalogeropoulos G., Dimoudi A., Touboulidis P., Zoras S. (2022). Urban Heat Island and Thermal Comfort Assessment in a Medium Sized Mediterranean City. *Atmosphere*, 13 (7), 1102. <https://doi.org/10.3390/atmos13071102>
- Kamal-Chaoui, Lamia, Alexis Robert (eds.) (2009), "Competitive Cities and Climate Change", OECD Regional Development Working Papers N° 2, 2009, OECD publishing, © OECD.
- Karnieli A., Agam N., Pinker R. T., Anderson M., Imhoff M. L., Gutman G. G., Panov N., Goldberg A. (2010). Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment Merits and Limitations. *Journal of Climate*. 23, 3, pp. 618-633. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2900.1>
- Kousis I., Pigliautile I., Pisello A. L. (2021). Intra-urban microclimate investigation in urban heat island through a novel mobile monitoring system. *Scientific Reports*-11:9732. [10.1038/s41598-021-88344-y](https://doi.org/10.1038/s41598-021-88344-y)
- Li H., Liu Y., Zhang H., Xue B., Li W. (2021). Urban morphology in China: Dataset development and spatial pattern characterization. *Sustainable Cities and Society*. Vol 71, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102981>
- Li J., Mao Y., Ouyang J., Zheng S. (2022). A Review of Urban Microclimate Research Based on CiteSpace and VOSviewer Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 19(8), 4741. <https://doi.org/10.3390/ijerph19084741>
- Li, X.; Zhang, G.; Zhu, S.; Xu, Y. (2022) Step-By-Step Downscaling of Land Surface Temperature Considering Urban Spatial Morphological Parameters. *Remote Sensing*. 14, 3038. <https://doi.org/10.3390/rs14133038>
- Liu, B., Deng, Y., Li, M., Yang, J., Liu, T., (2021). Classification Schemes and Identification Methods for Urban Functional Zone: A Review of Recent Papers. *Applies Sciences*. 11 (21), 9968. <https://doi.org/10.3390/app11219968>
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., (2020a). City-descriptive input data for urban climate models: model requirements, data sources and challenges. *Urban Clim*. 31:100536
- McGee III J. A., Day S. D., Wynne R. H., White M. B. (2012). Using geospatial tools to assess the urban tree canopy: decision support for local governments. *Journal of Forestry*. pp. 275-286. <https://doi.org/10.5849/jof.11-052>

- Montandon, L. M., Small, E. E. (2008). The impact of soil reflectance on the quantification of the green vegetation fraction from NDVI. *Remote Sensing of Environment* vol 112,4, 1835-1845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.09.007>
- Noblejas, H. C., Orellana-Macías, J. M., Rodríguez, M. F. M., (2022). Use of Vegetation to Classify Urban Landscape Types: Application in a Mediterranean Coastal Area. *Land* 2022, Vol. 11, Page 228, 11(2), 228. <https://doi.org/10.3390/LAND11020228>
- NOOA National Oceanic and Atmospheric Administration. April 2023 was Earth's fourth warmest on record. Retrieved from: <https://www.noaa.gov/news/april-2023-was-earths-fourth-warmest-on-record>. [Accessed May 12, 2023].
- Rahman, H. Md., Islam, H. Md., Neema, N. M. (2022). GIS-based compactness measurement of urban form at neighborhood scale: The case of Dhaka, Bangladesh. *Journal of Urban Management*, vol 11, 6-22. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2021.08.005>
- Rwanga S. S., Ndambuki J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences*, 8, 611-622. <https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033>
- Sánchez, R. (2012). Canillas, fuera del mapa. Actualidad, Historia, Reportes. *Hortaleza Periódico Vecinal*. 31 October 2012. Retrieved from: <https://www.periodicohortaleza.org/canillas-fuera-del-mapa/>
- Sattari F., Hashim M., Sookhak M., Banihashemi S., Beiranvand Pour A. (2022). Assessment of the TsHARP method for spatial downscaling of land surface temperature over urban regions. *Urban Climate*. Vol 45, 101265. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101265>
- Stewart, I. D., Oke, T. R., (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 93 (12): 1879-1900. doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1
- Wang J., Gao C., Wang M., Zhang Y. (2023). Identification of Urban Functional Areas and Urban Spatial Structure Analysis by Fusing Multi-Source Data Features: A Case Study of Zhengzhou, China. *Sustainability*. 15 (8), 6505. <https://doi.org/10.3390/su15086505>
- Yu D., Fang C. (2023). Urban Remote Sensing with Spatial Big Data: A Review and Renewed Perspective of Urban Studies in Recent Decades. *Remote Sensing*. 15 (5), 1307. <https://doi.org/10.3390/rs15051307>
- Zhao M., Cai H., Qiao Z., Xu X. (2016). Influence of urban expansion on the urban heat island effect Shanghai. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol 30, 12, 2421-2441. <https://doi.org/10.1080/13658816.2016.1178389>

Zhou, Y., Li, X., Chen, W., Seto, K. C. (2022). Satellite mapping of urban built-up heights reveals extreme infrastructure gaps and inequalities in the Global South. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol 119, 46. <https://doi.org/10.1073/pnas.2214813119>

Nanotechnology Applications for Sustainable Architecture

Eduardo Hernández Silva y Cecilia Bañuelos Barrón

Program on Nanoscience and Nanotechnology, Center for
Research and Advanced Studies of the National Polytechnic
Institute

Program on Science, Technology and Society, Center for
Research and Advanced Studies of the National Polytechnic
Institute

Correo electrónico: cebanuelos@cinvestav.mx

Abstract

In this chapter, authors present an overview around technical features of some nanomaterials that have been effectively used in architecture applications in the recent years, with significant benefits to quicken construction, sustainable management, and high-performance of materials, systems, and structures. In this context, nanotechnology has emerged as a promising discipline that offers sustainable design options for the environment and enables architects to design more flexible, functional and sustainable elements. Several nanomaterials display excellent mechanical, electrical, thermal, and chemical properties, resulting useful in a wide range of architecture applications. Here, some practical cases of nanotechnologies applied on architecture are briefly described, in order to socialize among experts, the potential use of nanomaterials in sustainable building construction and conditioning.

Keywords: Nanomaterials, architecture applications, sustainable design, nanotechnology, sustainable building construction.

Introduction

Nanotechnology is a multidisciplinary field that involves the development of compounds and materials at nanometric scale, varying the dimensions of molecules and particles to reach 1 to 100 nanometers (nm) (Mullins-Jaime & Smith, 2022; Teizer *et al.* 2012). This feature provides technical and some other advantages for the synthesis and application of structures, devices, and systems with novel properties and functions (Teizer *et al.* 2012). At the same time, advances in the nanotechnology sector have improved the implementation of innovative processes in several areas, such as food, agriculture, medicine, electronics, textile, environment, and architecture (Pandey & Jain, 2020).

Particularly, nanotechnology has been recently introduced in architecture, favouring some fundamental principles, such as space design, functionality, and building construction. Furthermore, its implementation has impacted costs, sustainability, and safety.

Nanotechnology in architecture has a wide variety of applications, especially in materials selection, from the early stages of sketching up, to the final touches of finishing, reflected on the design and the great impact on the architectonic methodology, by the new vast options that this multidisciplinary area offers (Fareq & Vats, 2022). Thus, nanomaterials can contribute for increasing the efficiency of commonly used construction materials in the industry, motivating engineers, architects, and designers to incorporate these technological advances in the design process, the production of friendly materials to the environment, cost-effective operations for sustainable building and the integration of adaptive nanomaterials into responsive facades of structures (Kuda & Yadav, 2022).

The construction industry has had an important progress in recent times by the implementation of nanotechnology, due to the development of nanostructured compounds to improve existing materials. Nanomaterials can contribute to traditional building materials with the enhancement of their characteristics, including durability and mechanical properties. Moreover, the novel properties introduced by nanomaterials could provide supplementary performance, for instance, adjustable conductivity or air-purifying properties for traditional building materials like concrete, which is the most common man-made material in the world (Kuda & Yadav, 2022; Lazaro, Yu & Brouwers, 2016).

According to emerging global trends in architecture, other building materials such as steel, glass, wood, and insulation supplies, are being significantly improved towards a more sustainable composition, to be widely adopted as economical, safe and eco-innovative options. Therefore, the use of nanotechnology in building materials constitutes an attractive solution to meet distinct challenges (Mullins-Jaime & Smith, 2022). Architecture is designed across scales and mirrors developments in science and research. Investigating matter on atomic, molecular and supramolecular scales, the field of nanotechnology has now started informing architectural

design. In turn, structures for building sciences and research have rapidly expanded. As architects and designers are taking on this typology in public and private sectors alike, the study and evolution of nanotechnology mirror broader developments in how sciences are flourishing.

Nanomaterials for construction industry

Nanotechnology applications in architecture has influence in several aspects as changing architectonic vision, design techniques and ideas, construction methods, structure technologies, forms and aesthetics of framework, mechanical systems, lighting, energy consumption, and maintenance and repair techniques (Fareq and Vats 2022). Nanomaterials can contribute to reduce the use of natural compounds, improving the performance of construction materials and decreasing the energy consumption. For that reason, the use of nanoparticles in construction offers a cheaper, faster, and safer approach to the production of construction materials (Mohajerani *et al.* 2019).

Properties of nanomaterials for construction

Although materials in the micro and macro-range dimensions (bulk materials) have constant physical properties regardless of their size, nanomaterials present diverse properties that are due to quantum mechanical effects and to other physical effects. For example, at nanometric dimensions, the particle size has a great influence on the material properties, as size can strongly impact melting point, fluorescence, chemical reactivity, and electrical conductivity. Specific surface area increases while the particle size is reduced, and the number of atoms on the surface is more significant than the inner part, increasing the amount of material exposed to the surrounding medium, making nanomaterials so more reactive than bulk materials (Lazaro, Yu & Brouwers, 2016). Other effects that nanomaterials can have on construction materials are the enhancement of mechanical performance and durability, with a series of properties like self-cleaning, self-healing, crack control, and sensing. Some nanomaterials used on construction materials are carbon nanotubes, titanium dioxide (TiO_2), silicon dioxide (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), and zirconium oxide (ZrO_2) (Papadaki, Kiriakidis & Tsoutsos, 2018), among others.

Some functional properties have been identified in these nanomaterials, for example, carbon nanotubes are molecular structures with a cylindrical morphology, and exhibit a very high strength and stability, improving the mechanical durability and crack prevention on concrete. These properties also have effects on the mechanical and thermal properties of ceramics and improve the capacity of real-time structural health monitoring. Titanium dioxide is a white pigment used as reflective coating and additive for paints, cements, and windows due to its sterilizing properties, and can degrade, volatile organic compounds, pollutants, and bacterial membranes through

photocatalytic reactions. Additionally, TiO_2 has hydrophilic properties and may be added to concrete to improve its characteristics. Silicon dioxide is a compound that may significantly increase the compression strength of concrete, also decreases the setting time of mortar in comparison with micro silica and improves the cohesiveness. Aluminum oxide, or alumina, is a component that provides a higher split tensile and flexural strength to concrete, therefore, cement could be replaced in the concrete mixture with a few percentages of Al_2O_3 nanoparticles. Zirconium oxide, or zirconia, is a crystalline, translucent, and inert material with a high surface area, that may be used as insulator due to its hardness, flexibility, and durability (Vigneshkumar 2014). In addition, nanomaterials with antimicrobial properties as silver (Ag), copper (Cu), and metallic oxides nanoparticles have been developed, and may be used in the production of antimicrobial coatings (Hanus & Harris, 2013). Therefore, the application of nanotechnology has the aim to improve the properties of construction materials and decrease their weaknesses, with the support of nanomaterials to increase and improve the application possibilities for construction purposes (Çubukcuoglu-Paksoy & Gür, 2022).

Applications of nanomaterials for construction

Nanotechnology has applications in the construction such as the infrastructure, environment, energy, and building, and nanomaterials may be used for cost management, weathering management, and durability of several materials such as coatings, paints, surfaces, concrete, and adhesives (Çubukcuoglu-Paksoy & Gür, 2022; Pandey & Jain, 2020). Infrastructure includes applications as highway and bridge construction by the high-performance concrete production, and environmental applications include asphalt, cobblestone, and concrete applications to increase the air quality by reducing pollution. Moreover, energy can be benefited by the production of low-cost and flexible photovoltaic panels with a higher performance and the production of new generation storage systems. Attention has also been putted to health, through the production of air and water purification systems, based on the use of nanoparticles for the removal of pollutants, viruses and bacteria, avoiding the release of oxidize to the air, and for detoxification and elimination of industrial wastes from water (Ahmed & Gharib, 2020). Additionally, nanomaterials may have applications as antimicrobial surfaces in a range of health infrastructure, including hospitals, childcare centers and nursing homes, for reducing the disease spread, illness and discomfort (Hanus & Harris, 2013). For all above, in the construction industry, applications are also focused on the improvement of structures, using nanomaterials in several material construction for building structural system (Çubukcuoglu-Paksoy & Gür, 2022) as shown in Table 1.

Table 1. Summary of common applications of some nanomaterials for improvement of construction materials.

Building material	Nanomaterial	Applications	Ref.
	Copper oxide (CuO)	Production of copper oxide nanocoated concrete pipes for bacterium inhibition	Dhiman et al. 2022
Concrete	SiO ₂	Increase in mechanical strength	Mullins-Jaime and Smith 2022
	TiO ₂	Self-cleaning and removal of toxins	
	Iron oxide (Fe ₂ O ₃)	Improvement in compressive strength and abrasion resistance	
	Carbon nanotubes	Production of strong, electrically conductive, and self-healing concrete	
Glass	SiO ₂	High levels of fire protection	Ali 2020
	TiO ₂	Degradation of pollutants and volatile organic compounds	
	Alkylsilanes and fluoroalkylsilanes based nanocoatings	Glass protection from water and atmospheric gases that cause weathering and decay	
	Tungsten dioxide (WO ₂)	Production of smart windows, with light and heat passing control	Jones et al. 2019
	Metallic oxide coatings	Thermal insulation and internal climate control	
Insulation materials	SiO ₂ based aerogels	Production of highly effective thermal insulants as insulation blankets, translucent windows, or vacuum-insulated panels	Mullins-Jaime and Smith 2022
Bricks	Clay nanoparticles	Production of bricks with high compressive strength and surface roughness	Mohajerani et al. 2019
Mortar	Clay nanoparticles	Employment as an epoxy coating for repairing or replacing materials	
	SiO ₂	Obtention of more efficient mortar with a higher permeability	
Steel	Polymeric nanocomposites	Reduction of heat released and increment of fire retardancy	Mullins-Jaime and Smith 2022
	Cu Nanoparticles	Maintenance of structural integrity at high temperatures and corrosion resistance	Ali 2020
	Metallic coatings	Production of steel with high strength, toughness in welding and wear resistance	Jones et al. 2019
Wood	Manganese ferrite (MnFe ₂ O ₄)	Fire resistance and electromagnetic wave-absorbing	Mullins-Jaime and Smith 2022
	Polyelectrolyte complexes	Fire resistance and increase of strength	
	TiO ₂	Water absorption, UV-protection, fire resistance and durability	Papadopoulos and Taghiyari 2019;
	ZnO		
	CuO	Water absorption, improvement of mechanical properties, and durability against biological degradation	Dhiman et al. 2022

Drywall	Coatings of Nano-sized Boron Nitride (BN)	Fire resistance and thermal stability	Mullins-Jaime and Smith 2022
	Clay nanoparticles	Increase of density and strength of building materials	
	SiO ₂ based aerogels	Production of vacuum insulated panels for installation in walls, flooring and roofs.	Jones et al. 2019
	Calcium sulfate (CaSO ₄)	Light interior walls and ceilings, water and mildew resistance, less energy consumption in construction	Ahmed and Gharib 2020
Coatings	ZnO	Production of coatings for conservation and protection of marble surface from fungal species	Dhiman et al. 2022
	Ag nanoparticles	Protection of building materials from surface damage by microorganisms	Dhiman et al. 2022
	Halloysite and clay nanoparticles	Production of higher efficient anticorrosion coatings	Hanus and Harris 2013
	TiO ₂	Evaporative cooling hydrophilic coatings based on rainwater evaporation to building cooling	Hanus and Harris 2013
Devices	Quantum dots	Fabrication of nanoleds for more energy efficient lighting, purified indoor air and water filtration	Ahmed and Gharib 2020
	Semiconductor nanocrystals	Fabrication of solar panels with a higher electron current for more efficient electricity production	Lazaro, Yu and Brouwers 2016

Source: Own elaboration.

Nanotechnology and sustainability

The technological innovations are based on the scientific fundamentals for minimizing the cost and risk factors with the purpose of generate major benefits to society (Pandey & Jain, 2020). In this regard, nanotechnology is focused on functionality and sustainability, since one of the aims of this area is to take advantage of the properties of diverse materials at nanometric scale, using the minimum amount of raw material and energy, to generate new benefits or increase the existing in several industrial sectors, as construction, and other knowledge fields (Ahmed & Gharib, 2020).

Sustainable construction

The construction industry is in continuous searching of novel materials contributing to sustainability and efficiency (Hanus & Harris, 2013). Nanotechnology has contributed to the generation of qualitative breakthroughs that are effective on architecture, based on the improvement of construction materials for minimizing its negative effects on humans and environment (Ali & Kharofa, 2021). Nanotechnology has opened a broad range of new opportunities for a sustainable building through construction materials, to confer them a higher performance in energy efficiency, durability, economy and sustainability (Mohamed, 2015).

In general, sustainable construction, or sustainable architecture, can be defined as the creation and responsible management of a healthy built environment based on efficient employment of energy and resources, and ecological principles, which include

minimizing non-renewable resource consumption, reduction of the natural environment damage, and eliminating or minimizing the use of pollutants. Sustainable building is an architectural concept that involves those buildings that have minimum adverse impacts on the environment, in benefit of the buildings themselves, and the local, regional and global settings. Sustainable buildings meet the characteristics of resource and energy efficiency, pollution prevention, harmonization with environment, and integrated and systemic approaches in environmental management systems. These building practices are focused on integral quality of economic, social and environmental sectors through the rational use and appropriate management of natural resources that contribute to saving scarce resources, for reducing the energy consumption and improving environmental quality (Rezaei, 2018). Thus, to obtain the best results and impacts, it results necessary that several experts and disciplines converge to provide supplementary knowledge, experience and practices.

Benefits of nanotechnology in architecture and construction

Since the architecture and construction industry is strongly involved in the economic development and consumption of resources and energy, a key factor to consider in nanotechnology applications in the construction industry is the importance of managing environmental and social impacts. For example, sustainable buildings must be more economic and energy consumption efficient to conduct certain processes of well-being as lighting and temperature regulation, to avoid increases in environmental pollution, resulting on a social benefit to have healthier and more comfortable spaces for developing daily life and occupational activities (Mohamed, 2015). In addition to those benefits, nanotechnology in architecture can follow aesthetic objectives, through creative design and the adoption of new ways of producing models with harmonic and aesthetic values, as well as functional objectives (Ali & Kharofa, 2021).

Economic benefits

Currently, nanomaterials may have excessive costs yet, due to the novelty and complexity of synthesis processes and the equipments employed for the characterization of the materials, although these costs may decrease over time as the demand increases and manufacturing technologies improve. However, in specific cases, the common materials of construction and traditional architectonic methods may remain as the most cost effective (Firoozi, Taha & Firoozi, 2014). The above means that the economic benefits of nanotechnology in the architecture and construction industry can be reflected in the efficiency of the potential applications that they may have, resulting in a decrease in costs for the products profitability.

It has been shown how some nanomaterials have had positive economic effects in the construction industry and how companies have obtained advantages at a competitive level. For example, the construction market in the United States has been benefited due to the application of nanotechnology in some construction materials and

products, such as nano-modified concrete, paints and coatings with a few amounts of nanoparticles, and nanotechnology-based equipment as drilling equipment or fire protection systems, in which an evident increase in percentage of cost effectivity and monetary gains have been reported. Additionally, the construction industry has a high labor-intensive requirement, considering that up to 55% of the construction costs is assigned to labor in several construction projects. Therefore, by developing sustainable processes based on nanotechnology, building companies could significantly reduce the construction, operation and maintenance costs, and finally increase their assets performance (Teizer *et al.*, 2012).

Environmental benefits

The use of nanomaterials in architecture may represent new and several opportunities by significantly improving the construction efficiency and the way that sustainable constructions may benefit (or at least reduce their impacts) to the environment (Fareq & Vats, 2022). The use of nanomaterials can reduce the amount of required raw or bulk materials to achieve or get over similar strength and durability properties of common construction materials, resulting on favorable effects for the environment. The cement production process is a good example illustrating the favorable impact of nanotechnology to the environment, because this process is responsible for the emission of considerable amounts of carbon dioxide (CO₂) and other pollutants. However, additives such as belite, calcium sulfoaluminate and calcium aluminoferrite have been found to reduce the CO₂ emissions by nearly 25% in the cement production process (Teizer *et al.*, 2012).

Another consideration is the existence of unacceptable high levels of waste concrete around the globe, especially with the depletion of natural resources, so, environmental management plans of construction sites have established the reusing and recycling of materials for other construction projects. Concrete recycling with SiO₂ nanoparticles has been recently investigated, and it has been found to possess higher compressive strength than the typical recycled concrete, since this nanomaterial improves the structure, durability and mechanical properties (Mohajerani *et al.*, 2019).

Social benefits

In general, the benefits of nanotechnology in construction impact the health, safety and economy of society. As an example of this, we refer the fires that frequently occur in houses, residences and work operation areas. Fire deaths and injuries are a serious safety and public health concern, and nanotechnology has demonstrated to have the potential for improving fire safety in residential or industrial constructions and prevent unnecessary injuries and deaths (Mullins-Jaime & Smith, 2022). In this sense, the application and use of nanomaterials usually confers protection and resistance properties to building materials. In health, benefits have been observed with air and water purification systems for the elimination of contaminants and patho-

genic microorganisms, in addition to the formation of antimicrobial surfaces using films that serve to protect and maintain sterility in hospital operating rooms, hygienic areas, and spaces for people in health recovery process. Finally, the economic benefits are reflected in the monetary savings of people, employers and entrepreneurs, due to the application of nanomaterials providing resistance and durability, which in turn, gives an extension in the useful life of the structures, postponing the possibility of investing money in repairs, remodeling or reconstructions. Further research results necessary to evaluate and determine accurately the quantitative effects by the implementation of nanotechnology.

The above demonstrates that the application of nanotechnology In architecture and the construction industry can produce significant benefits through the adoption of nanoscale materials (Teizer *et al.*, 2012), although the use of a particular construction material must be justified, based on the requirements of resistance, durability, economy and decrease of health and environmental risks than conventional coatings and materials (Mullins-Jaime & Smith, 2022).

Reference cases of nanotechnology in architecture

Academics and specialists have considered the application of nanotechnology as one of the most profitable modern methods for development of sustainable buildings with high functional efficiency. The economic, social and environmental advantages of nanotechnology in architecture and construction industry, have allowed its application to some urban structures such as administrative, commercial, educational, health, recreational and residential buildings. Under this concept, the design and construction of building involve the application of nanotechnology to achieve a wide array of functionalities, including strength, light filtering, thermal insulations, sound insulations, weather resistance and architectural appearance (Rehan, 2021).

Residential buildings

Applied nanomaterials provide a new type of ultra-energy efficient houses and residential buildings, exploiting the new construction materials developed (Rehan, 2021). An example of these materials are aerogels, which have architectural applications such as windows, skylights, light wall panels, and facades. Applying an aerogel insulation layer to exterior walls and roofs prevents heat from escaping the surrounding area, and aerogel blankets or sheets can be used to protect the exterior and interior of the walls, allowing to save energy, reduce CO₂ emissions, and protect the home from structural damage. It was the case of an old house in Les Bois, Switzerland, where a 30 mm thick layer of High-Performance Insulating Aerogel was applied. Houses built with wooden structures also display benefits derived from nanotechnology, since highly water-repellent coatings have been developed by incorporating SiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles, and hydrophobic polymers. Furthermore, carbon nanofibers and nanoclay addition increase the wood stiffness, and ZnO and TiO₂ nanoparticles

improve the fire resistance and UV and water absorption, providing a safer alternative to traditional treated lumber in the development of wood structures for houses and residential buildings (Kuda & Yadav, 2022).

Health and caretaking buildings

Some relevant benefits have been reported in the health sector from the application of architectural nanotechnology. A building that suitably represents this situation is the hospital “Dr. Manuel Gea González” in Mexico, where TiO_2 was used as a pigment due to its self-cleaning and germicidal qualities. A ProSolve brand TiO_2 coating was applied for its antimicrobial and depolluting effects, as well as providing visual complexity, as a response to elevated levels of city’s air pollution, since according to some studies, the Specialties Tower facade can counter air pollution generated from particles emission of 1,000 cars per day (Rehan, 2021). Another considerable aspect is the temperature control within habitable spaces, which has a high energy consume for heating and cooling, leading to CO_2 emissions that directly impact climate change. Nevertheless, energy consumption can be significantly reduced through nanotechnology, with the use of phase modification materials for the latent heat storage as an effective way to adjust the room temperature. This system was applied in “Sur Falveng”, a nursing home in the Swiss Alps. The building has a glass façade, which contains a salty hydrate filling device that acts as a heat sink, whose function improves the control of the building temperature, resulting in significant energy savings (Kuda & Yadav, 2022).

Commercial and administrative buildings

The Marunouchi skyscraper in Tokyo, Japan, is a multi-commercial building that has a self-cleaning system on its facade, based on photocatalytic coatings containing TiO_2 nanoparticles for breaking down dirt by exposure to sun’s UV rays, and volatile organic compounds are oxidized into CO_2 and water, then washed away by rain (Sev and Ezel 2014).

Regarding insulation systems, vacuumized insulated panels improved with nanomaterials have been used for insulation and temperature regulation in external walls, window parapets, and ventilation flaps on the main facade. These panels offer ten times the insulation of other conventional materials, so they have been implemented in buildings such as the Sonnenschiff Center, in Freiburg, Germany (Kuda & Yadav, 2022). Nanotechnology was also applied in the corporate building of the company Enexis Groep in Zwolle, the Netherlands, where carbon nanotubes were used to produce large-sized facade elements with the concrete. These carbon nanotubes added to the concrete mix, provided low panel weight and fast and easy installation. In addition, low energy consumption contributed to the shape of the panels. Finally,

nanoconcrete with TiO_2 additives was used in the Air France Headquarters building, in Paris, France, with the aim of providing self-cleaning functions to the walls (Çubukcuolu-Paksoy & Gür, 2022).

Educational and learning institutes

The thermal insulation produced by the application of SiO_2 aerogels has been applied as thermal insulation of buildings, particularly, in areas with little space and in surfaces where optical transparency is required, such as windows and skylights, respectively, being the case of translucent insulation used as a curtain wall in the Sculpture Building and Gallery, at the Yale University of the United States. In a school in Mortara, Italy, it has been applied the addition of TiO_2 nanoparticles in its concrete structure to maintain the build aesthetic characteristics, such as color and constant self-cleaning (Hanus & Harris, 2013). Phæno Science Center in Wolfsburg, Germany, is the Europe's largest self-compacted concrete structure, reinforced with nanoparticles and carbon nanotubes to penetrate and close small cracks on the concrete surface. The above means that nanotechnology can provide an intelligent solution by providing a coating for repairing or preventing failures in the structure formed with concrete. Museums have also applied nanotechnology to implement and improve their sustainability, as the Ara Pacis Museum, in Rome, Italy, where nano-treated glass with TiO_2 was used as a self-cleaning and disinfection system with an excellent water flushing function, allowing to minimize maintenance and save cleaning and sanitation costs (Kuda & Yadav, 2022). Another museum located at the same city is the Maxxi Museum, constructed with reinforced concrete walls, wide beams and composite trusses. Due to its interior design, with wide openings and galleries running throughout the building, an easily-settling nanoconcrete mixture results more suitable for an efficient structural systems design, because it has the potential to hold up to three times more load than traditional systems (Çubukcuoglu-Paksoy & Gür, 2022).

Social and recreation enclosures

Nanotechnology has also been applied in buildings for social gatherings or entertainment. The Jubilee Church in Rome, Italy, was one of the first constructions in which self-cleaning concrete was applied. The structure was designed for controlling internal heat increase through the large thermal mass of its walls, which contain titanium dioxide to maintain the church's white appearance. The structure was constructed with 346 prestressed concrete blocks made with white cement and TiO_2 nanoparticles. The monitoring of this technical implementation was followed up for the first six years, revealing only slightly differences between the white color of the outside concrete surfaces and the inside blocks; those color variations due to presence of inorganic substances could be eliminated by simple water washing (Kuda & Yadav, 2022; Hanus & Harris, 2013; Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). This same application

was conducted on the Music and Art city hall known as Cité de la Musique (City of the Music) in Chambéry, France, whose facade maintained its color almost constant during the first five years. In these two cases, a long term structure health monitoring has shown that the use of an application of modified concrete is suitable for the aesthetic and integral conservation of structures (Hanus & Harris, 2013).

In the Milwaukee County Zoo's Florence Mila Borchert Big Cat Country building, aerogel-filled glass panels were installed on the roof of the feline cages to provide independent daylight inside, with the purpose of offering warmth conditions in winter, and cool ones in summer to animals. This kind of application confers sustainable benefits in several aspects by increasing energy efficiency, thermal performance and structural damage decreased rates. Particularly, this building began to show defects on stone and concrete structures due to its age. Additionally, the nanotechnological application also provides a direct benefit to the comfort of felines, one of the most important zoo's attraction for the enjoyment of the visiting public (Kuda & Yadav, 2022).

Urban infrastructure

Diverse constructions that are part of the urban infrastructure are mainly composed of steel, another material benefited by nanotechnological innovations, using copper nanoparticles that reduce defects on the steel surface and prevent the formation of cracks. In addition, nanoparticles can restore heat-affected areas and improve the lifetime of the weld with the inclusion of magnesium and calcium. Furthermore, the refining of nanometric-sized cementite has contributed to obtaining stronger and more resistant high-power metal cables, used for the construction of suspension bridges with a significant reduction in material prices and construction times (Kuda & Yadav, 2022). Other practical cases in which nanotechnology applications have also acted in benefit of urban mobility are the roads, as the 7th Belt Roadway in Tokyo, Japan, where cement mixtures containing TiO_2 colloidal solutions have been used to coat the roadway. With this application, nitrous oxide degradation results have been obtained in a 300 m² area from 50 to 60 mg per day, corresponding to NO_x emissions from 1,000 vehicles average (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011; Hanus & Harris, 2013). In China, a section of concrete road on the federal highway G11 at the Zhonghe Toll station was coated with a solution containing TiO_2 nanoparticles and activated carbon. After three months, analyses showed diminished degradation rates of 37% and 25.84% for nitrous oxide and nitrogen dioxide, respectively.

Perspectives of nanotechnology in architecture and construction

Although the advantages and benefits in which nanotechnology can contribute to architecture and the construction industry have already been mentioned, it is also important to pay attention to the potential yet unknown undesirable health or environmental effects of nanomaterials, but always considering the energy efficiency

and performance enhancement and other advantages to objectively evaluate cost/benefit relationships (Papadaki, Kiriakidis & Tsoutsos, 2018). Therefore, it results necessary to regulate the synthesis and manufacturing quality processes in terms of sustainability, so more research and practice efforts are needed with strategic design and planning, for reaching more sustainable construction projects regarding energy savings, resource usage reduction, and possible damages to health and environment. This may be feasible by establishing systems to identify the environmentally friendly and sustainable construction nanomaterials, to avoid the use of injurious materials in the future (Vigneshkumar, 2014). In addition, not least important are the economic perspectives of nanotechnology, which are based on the improvement of material properties in a more refined way, for increasing the competitiveness and growth of innovative companies, according to their abilities to apply nanotechnologies and diversify their use in novel nanomaterials and future projects (Papadopoulos & Taghiyari, 2019).

Considerations for nanomaterials application

The application of nanotechnology in architecture and sustainable construction is still a very debatable topic, so, nanomaterials application strategies need the multi-level support and collaboration of diverse stakeholders from the public and private sectors, as governments, research and development firms, manufacturers, and other industries (Kuda & Yadav, 2022). This eventually will make possible that nanomaterials can be strictly assessed from sustainability perspectives, with the further analysis of their unknown impacts on health-related issues or on environment. Considering life cycle assessments on both, nanomaterials and buildings, the develop and growth of the construction industry can improve importantly, which represent a greater advance on sustainability matter (Papadaki, Kiriakidis & Tsoutsos, 2018).

Considerations for health and environment

A major concern involves the adverse health and environmental effects that nanomaterials may have, if considering that manufactured nanomaterials enter the environment during the production, transportation, use and disposal. In the specific case of the construction industry, demolitions constitute another nanoparticle release sources to environment, and exposure to nanomaterials during these phases may occur via inhalation, dermal contact and ingest, being them the primary reason for the increase of adverse impacts on human health (Mohajerani *et al.*, 2019; Vigneshkumar, 2014; Sev & Ezel, 2014). Since nanomaterials must be processed and decomposed, construction industry workers, as well as technical specialists, focused on construction research and development, or even they search in some other fields or ways of application, taking into account that exposure to nanomaterials entails several risks and hazards. Under these conditions, they should carry out their studies and should

be trained using interdisciplinary approaches (Kuda & Yadav, 2022; Vigneshkumar, 2014). To improve and increase the favorable effects of nanomaterials on both, health and the environment, applying tools such as a life-cycle assessment (LCA) could be addressed, therefore, regulations and reliable tests are required before the commercialization and industrialization of such products, mainly for those designed for indoor applications (Ali, 2020).

LCA is a comprehensive and robust tool to assess the environmental sustainability of a product, or a system. This approach introduces environmental considerations for decision and policy makers, researchers and other communities. Specifically, this tool can be used to assess the synthesis and use of nanoparticles in the construction industry, and all the material's production cycle can be optimized, from extraction to recycle and reuse. LCA reports can also be used for establishing preservation methodologies to the environment and achieving sustainable development; improve productivity and competitiveness of green constructions; and finally, promote environmental processes and services by increasing the quality of people lives in a healthier environment (Papadaki, Kiriakidis & Tsoutsos, 2018).

Considerations for economy

Economic considerations are interconnected in ensuring a robust and cost-effective supply chain between resources and building materials production. Simplicity and scalability of production are other important economic factors in cost effectiveness of nanotechnological building materials, and costs can be driven down by synthesis, manufacture and implementation of processes improvements. However, cost reduction through scalability will be heavily dependent on demand, which at the same time, will be dependent on safety product assurances (Mullins-Jaime & Smith, 2022). Moreover, it is expected that nanomaterials will enable specific solutions to complex problems, leading to large scale applications and therefore, increasing the cost effectiveness even more (Papadaki, Kiriakidis & Tsoutsos, 2018).

Research and application-related considerations

Construction and nanotechnology cover a broad spectrum of engineering theoretical and practical basis, hence, knowledge appropriation practices must be provided at different levels of the academic sector. Interdisciplinary and advanced curricula focused on industrial and nanotechnology-related subjects, will provide the students the skills and competences to participate in industrial research-development projects, learn about current technical basis and cutting edge methodologies, and vanguard instrumentations. This will conduce eventually to the creation of innovative ideas, products and services based on nanotechnology, leading to a technology push in the long run (Pandey & Jain, 2020). Is very important to consider timely some academic strategies to achieve these objectives.

It is overriding to understand the interaction between the nanomaterials and implanted base materials by modeling methods, for systematically describing and understand the experimental findings from the point of view of interaction mechanisms. Also, is fundamental to acquire a comprehensive understanding around the environmental and health effects that nanotechnology could bring to human beings, through research activities on the toxicity of nanomaterials, safety issues in manufacture and disposal processes after structures demolishing where nanomaterials were applied. Appropriate experimental facilities and approaches for research must be provided. Moreover, new analytical methods must be implemented for detecting, imaging, analyzing, and evaluating the synthesis of nanomaterials. Finally, current standards must be improved, and new ones proposed for the assessment of processes performance through nanomaterials development (Lazaro, Yu & Brouwers, 2016).

Regulation and legislation

To improve sustainability through the applications of nanotechnology in architecture and construction industry, it is essential to have a high control and balance in the production, marketing, usage, risk assessment, and management of nanoparticles. Proper regulations and legislations are vitally important because without them, the applications of nanotechnology may lead to serious grievances causing irreparable damage to the environment and health (Pandey & Jain, 2020). For that reason, some countries as the United States, Australia, and China, as well as others pertaining to the European Union, and international bodies as the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), have already introduced regulations and activities to limit the potential hazard development of nanomaterials, and provide favorable frameworks for the responsible use and application of them (Mohajerani *et al.*, 2019).

As a reference, the United States are regulating nanoscale materials under the Toxic Substances Control Act (TSCA) to ensure that their production and use do not pose potential risks to human health and environment. TSCA has stipulated that producers of new substances should provide detailed information to the Environmental Protection Agency (EPA) for materials or product assessment, prior to their production and introduction to the market. Under this regulation, EPA has received and reviewed over 160 new chemicals based on nanoscale materials since 2005 and has allowed the limited manufacture of nanomaterials with a strict control against all possible risks. However, in adverse situations, EPA has limited the nanomaterials application and has introduced engineered controls, for limiting environmental releases through the generation of both, health and environmental effects data.

The Australian body for workplace safety, Safe Work Australia, has established that nanoparticles fall under the technologies, chemicals, substances, and materials legislation and addresses the nanomaterials-associated risks via elimination, minimization, or communication. This governmental agency has also released recommendations regarding nanomaterial emissions and exposure management to be adopted

in workplaces, and outside that limits, such recommendations are regulated and notified by the Department of Health National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme.

In China, although a regulation on nanotechnology is not present, there are organizations funded by the government for developing research on the environmental, health, and safety implications of this subject, as the National Centre for Nanoscience and Technology and the Chinese Academy of Sciences, which investigate, among others, the cellular toxic effects of nanomaterials. Furthermore, currently, over 30 research organizations are focused on the research of the environmental and toxicological effects of nanotechnologies, and establish methods for recovering diverse nanoparticles and nanomaterials from manufactured products in China.

In 2012, the European Commission deemed that nanomaterials can be ruled under the regulations regarding chemical releases into the environment, in both, commercial and household waste applications, although, in 2011, the European Union adopted a broad definition of nanomaterials to include particulate and colloidal suspensions. Therefore, the aims of this legislation are to regulate, promote and improve practices, assess risk, and enhance knowledge to identify and remediate any health or environmental risk as the understanding of nanomaterials increases. Nevertheless, more research is required to address specific questions related to regulation, based on the definition of nanomaterials established by the European Commission, in addition to the development of methods for assessing the safety of nanomaterials.

In 2006, the OECD launched the Working Party for Manufactured Nanomaterials (WPMN) to report about the approaches to hazards, exposure, and risk assessment with science-based evidences, and to ensure high quality in manufactured nanomaterials. OECD and its member countries concluded that nanomaterials safety can be assessed by the same current testing and assessing procedures of traditional chemical products, with the possibility of modifying these procedures based upon nanomaterial specificity. The OECD efforts are supported by the International Organization for Standardization (ISO), which established the technical committee ISO/TC 229 in 2005 for addressing standardization within the field of nanotechnology, under the understanding and control of the phenomena generated by nanomaterials for possible new applications and their use for improving materials, devices, and systems; hence, providing a standard framework for nomenclature, metrology, instrumentation, reference materials, testing methodologies, modelling, simulation, and health, environmental and safety practices.

Concluding remarks

Nanotechnology implies the synthesis and manufacture of new systems, products and goods at the molecular level, specifically, the nanometric scale. It is a multidisciplinary scientific and technological field undergoing explosive development, with revolutionary advances in distinct sectors, including architecture. The promise of

innovative properties from nanotechnological materials, strengthen the interest in the field, for improving construction supplies. Several successful applications in architecture have been documented. However, this field of applied knowledge also requires a regulatory framework to evaluate and regulate potential risks and hazards yet unknown, around nanomaterials and bionanomaterials. Further research will highlight both, the benefits and negative effects of using nanomaterials for building purposes.

References

- Çubukcuoglu-Paksoy, B., & Gür, N., (2022). The role of nanotechnology in concrete applications in architecture. In: *Sustainable current approaches in architectural science and technology* [online]. Lyvre de Lyon. pp. 67–79. [Accessed November 16, 2023]. Available in: https://www.researchgate.net/publication/364651668_SUSTAINABLE_CURRENT_APPROACHES_IN_ARCHITECTURAL_SCIENCE_AND_TECHNOLOGY
- Ahmed, B. & Gharib, N., (2020). Paths Towards Energy Efficient Buildings Using Nano Architecture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. **974**, 012019. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1088/1757-899x/974/1/012019
- Ali, A. A., (2020). Nanotechnology in Civil Engineering Construction. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research* [online]. 87–90. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.18178/ijscer.9.1.87-90
- Ali, R. A. & Kharofa, O. H., (2021). The impact of nanomaterials on sustainable architectural applications smart concrete as a model. *Materials Today: Proceedings* [online]. **42**, 3010–3017. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.814
- Dhiman, N. K., Sidhu, N., Agnihotri, S., Mukherjee, A. & Reddy, M. S., (2022). Role of nanomaterials in protecting building materials from degradation and deterioration. In: *Biodegradation and Biodeterioration At the Nanoscale* [online]. Elsevier. pp. 405–475. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/b978-0-12-823970-4.00024-5
- Fareq, R. U., & Vats, A., (2022). Application of Nanotechnology in Interiors of Building. In: *Research Trends in Agriculture Sciences* [online]. AkiNik. pp. 123–130. [Accessed November 16, 2023]. Available in: https://www.researchgate.net/publication/312801498_Nanotechnology_in_Architecture_and_Interior_Design
- Firoozi, A. A., Taha, M. R., & Firoozi, A. A., (2014). Nanotechnology in civil engineering. *EJGE* [online]. **19**, 4673–4682. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: https://www.researchgate.net/profile/Ali-Akbar-Firoozi/publication/287283673_Nanotechnology_in_civil_engineering/links/579d-581f08ae5d5e1e14c290/Nanotechnology-in-civil-engineering.pdf
- Hanus, M. J. & Harris, A. T., (2013). Nanotechnology innovations for the construction industry. *Progress in Materials Science* [online]. **58**(7), 1056–1102. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/j.pmatsci.2013.04.001
- Jones, W., Gibb, A., Goodier, C., Bust, P., Song, M. & Jin, J., (2019). Nanomaterials in construction – what is being used, and where? *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* [online]. **172**(2), 49–62. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1680/jcoma.16.00011

- Kuda, A. & Yadav, M., (2022). Opportunities and challenges of using nanomaterials and nanotechnology in architecture: An overview. *Materials Today: Proceedings* [online]. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/j.matpr.2022.07.052
- Lazaro, A., Yu, Q. L. & Brouwers, H. J. H., (2016). Nanotechnologies for sustainable construction. In: *Sustainability of Construction Materials* [online]. Elsevier. pp. 55–78. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/b978-0-08-100370-1.00004-4
- Mohajerani, Burnett, Smith, Kurmus, Milas, Arulrajah, Horpibulsuk & Abdul Kadir, (2019). Nanoparticles in Construction Materials and Other Applications, and Implications of Nanoparticle Use. *Materials* [online]. **12**(19), 3052. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.3390/ma12193052
- Mohamed, A. S. Y., Nano-Innovation in Construction, a New Era of Sustainability, (2015). In: *International Academy of Engineers* [online]. International Academy of Engineers. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.15242/iae.iae0415416
- Mullins-Jaime, C. & Smith, T. D., (2022). Nanotechnology in Residential Building Materials for Better Fire Protection and Life Safety Outcomes. *Fire* [online]. **5**(6), 174. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.3390/fire5060174
- Pacheco-Torgal, F. & Jalali, S., (2011). Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials. *Construction and Building Materials* [online]. **25**(2), 582–590. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009
- Pandey, G. & Jain, P., (2020). Assessing the nanotechnology on the grounds of costs, benefits, and risks. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* [online]. **9**(1). [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1186/s43088-020-00085-5
- Papadaki, D., Kiriakidis, G. & Tsoutsos, T., (2018). Applications of nanotechnology in construction industry. In: *Fundamentals of Nanoparticles* [online]. Elsevier. pp. 343–370. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1016/b978-0-323-51255-8.00011-2
- Papadopoulos, A. N. & Taghiyari, H. R., (2019). Innovative Wood Surface Treatments Based on Nanotechnology. *Coatings* [online]. **9**(12), 866. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.3390/coatings9120866
- Rehan, N. M., (2021). Nanotechnology as a Sustainable Approach for Achieving Sustainable Future. *World Journal of Engineering and Technology* [online]. **09**(04), 877–890. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.4236/wjet.2021.94060

- Rezaei, D., (2018). Nanotechnology, a step toward sustainable architecture. *Journal of Engineering and Applied Sciences* [online]. **13**(16), 6692-6699. [Accessed November 16, 2023]. Available in: https://www.researchgate.net/publication/328429110_Nanotechnology_a_Step_toward_Sustainable_Architecture
- Sev, A., & Ezel, M., (2014). Nanotechnology innovations for the sustainable buildings of the future. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering* [online]. **8**(8), 886-896. [Accessed November 16, 2023]. Available in: <https://www.scholar.waset.org/1999.3/9999095>
- Teizer, J., Venugopal, M., Teizer, W. & Felkl, J., (2012). Nanotechnology and Its Impact on Construction: Bridging the Gap between Researchers and Industry Professionals. *Journal of Construction Engineering and Management* [online]. **138**(5), 594–604. [Accessed November 16, 2023]. Available in: doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0000467
- Vigneshkumar, C., (2014). Study on nanomaterials and application of nanotechnology and its impacts in construction. *Discovery* [online]. **23**(75), pp. 8-12. [Accessed November 16, 2023]. Available in: https://www.researchgate.net/profile/Vigneshkumar-Chellappa/publication/359359896_Study_on_Nanomaterials_and_Application_of_Nanotechnology_and_Its_Impacts_in_Construction/links/6237416472d413197a352cd4/Study-on-Nanomaterials-and-Application-of-Nanotechnology-and-Its-Impacts-in-Construction.pdf

Capítulo 8

La Captación de Agua de Lluvia en la Ciudad de México: una Alternativa para Mejorar el Acceso

**Fabiola Sagrio Sosa Rodríguez , Jorge Gabriel
Vázquez Arenas, Arely Rivero Jaimes y Armando
Nava Arias**

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.
División de Ciencias y Artes para el Diseño. Posgrado en
Diseño Bioclimático

Correo electrónico: rosariotovaralcazar@hotmail.com

Resumen

El agua es un recurso vital para el desarrollo para el que no existen sustitutos. Su disponibilidad se ha reducido por el crecimiento demográfico y urbano, la contaminación de sus fuentes y el cambio climático; esto ha incrementado la desigualdad en su acceso tanto a nivel internacional como en la Ciudad de México (CDMX). Una posible solución para enfrentar esta problemática es la captación, tratamiento y reuso del agua de lluvia, la cual es una alternativa viable económica, social y ambientalmente para la CDMX. Entre los beneficios directos e indirectos de esta estrategia destacan: los ahorros por el pago del servicio de agua, los ahorros en los gastos de mantenimiento y operación, los ahorros por la reducción en el consumo de energía y los ahorros por la reducción en la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI). En este capítulo se realizó un Análisis Costo-Beneficio (ACB), utilizando como base la tecnología desarrollada por la UPIITA-IPN como parte del proyecto SECITI/095/2017. Bajo este contexto, este capítulo aborda las problemáticas del agua en el mundo, en México y en la CDMX. Reflexiona sobre las ventajas y desventajas de los sistemas para la captación de agua de lluvia (SCALL). Finalmente, analiza el potencial de captación de la CDMX y evalúa los costos y los beneficios de la tecnología desarrollada por la UPIITA-IPN para la captación de agua de lluvia, como una estrategia para reducir la inequidad en el acceso al agua.

Palabras clave: SCALL, Análisis Costo-Beneficio, Ciudad de México, viabilidad económica, beneficios económicos, co-beneficios.

Abstract

Water is a vital resource for development for which there are no substitutes. Its availability has been reduced by demographic and urban growth, pollution from its sources, and climate change. This situation has increased inequality in its access both internationally and in Mexico City (CDMX). A possible solution to this problem is collecting, treating, and reusing rainwater, an economically, socially, and environmentally viable alternative for CDMX. Among this strategy's direct and indirect benefits, the following stand out: savings from paying for water service, maintenance, and operation expenses, savings from the reduction in energy consumption, and savings from the reduction in generation of Greenhouse Gases (GHG). In this chapter, a Cost-Benefit Analysis (CBA) was

carried out, using as a basis the technology developed by the UPIITA-IPN as part of the SECITI/095/2017 project. Under this context, this chapter addresses water problems worldwide, in Mexico and CDMX. Reflect on the advantages and disadvantages of rainwater harvesting systems (SCALL). Finally, it analyzes the collection potential of CDMX and evaluates the costs and benefits of the technology developed by UPIITA-IPN for rainwater collection as a strategy to reduce inequality in access to water.

Keywords: Rainwater harvesting systems, Cost-Benefit Analysis, Mexico City, economic benefits, co-benefits.

Introducción

El agua es el único recurso fundamental para todas las formas de vida humana, para el cual no hay sustitutos, siendo su acceso imprescindible para un desarrollo sostenible. En la actualidad, la disponibilidad de este recurso hídrico se ha reducido; situación que ha estado acompañada de un acelerado crecimiento poblacional y económico. Esto ha generado una creciente preocupación por la posible escasez del agua para el consumo humano; problema que actualmente afecta a cuatro de cada 10 personas en el mundo (UN-Water, 2019). La falta de acceso al agua repercute en la calidad de vida de la población, siendo reconocido tanto el acceso al agua como al saneamiento como un derecho humano clave para el desarrollo individual y social por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) (UNW-DPAC, 2011).

En el caso de México, el derecho humano al agua se reconoció en febrero de 2012 en el artículo 4to de la Constitución. En éste se precisa que, todas las personas tienen derecho a tener acceso al agua, así como a la disposición y saneamiento de las aguas residuales de manera salubre y asequible, siendo el Estado la instancia responsable de garantizar este derecho con la participación de las entidades federativas, municipios y de la ciudadanía (CPEUM, art. 4). A pesar de este derecho constitucional, la inequidad en el acceso al agua en la CDMX es una problemática que afecta a poco más de 6 millones de capitalinos, lo que incrementa la competencia por el acceso a este recurso; esto puede favorecer la emergencia e intensificación de conflictos en situación de escasez.

Como respuesta a esta problemática, en muchos países se han desarrollado diversas estrategias para mejorar el acceso al agua, una de estas estrategias que pueden reducir la inequidad en el acceso al agua de calidad son los Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (SCALL). La instalación de estos sistemas se ha promovido en particular en zonas donde suelen carecer del servicio de agua potable o que suelen verse afectadas por su acceso intermitente, teniendo resultados favorables para mejorar la calidad de vida de la población. Ejemplos de estos países incluyen: Australia (Eroksuz y Rahman, 2010), India (Meter *et al.*, 2014), Japón (Zaizen *et al.*, 2000), Singapur, Berlín (Zhang *et al.*, 2017), y en China (Zhu *et al.*, 2004).

La captación y tratamiento del agua de lluvia permite que los usuarios tengan acceso a una fuente de abastecimiento adicional, disminuyendo la dependencia del suministro de agua que proviene directamente de la red, así como de otras fuentes

de abastecimiento como el tandeo o las pipas de agua. Por lo tanto, el desarrollo de los SCALL podría aliviar significativamente la desigualdad en el acceso al agua en la CDMX. Otros beneficios son que pueden reducir la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), al disminuir los elevados consumos de energía eléctrica para su transportación.

En este capítulo se realiza un Análisis Costo-Beneficio (ACB) para evaluar si la captación de agua de lluvia en la CDMX es viable económicamente, para lo cual se tomó en cuenta no sólo los beneficios económicos sino también los ambientales. Este análisis utiliza los resultados tanto de los costos como de los beneficios asociados con la tecnología desarrollada por la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del Instituto Politécnico Nacional (UPIITA-IPN), para cuya estimación se utilizó la información medida en campo sobre sus consumos de energía, ahorros en el suministro de agua, la reducción en la generación de GEI, así como sobre sus costos de adquisición, mantenimiento y operación.

En un primer momento se abordan las problemáticas del agua en el mundo y en México. Posteriormente, se desarrollan las problemáticas del agua que afectan a la CDMX, destacando el desigual acceso que afecta la salud y la calidad de vida, en particular de los grupos más marginado en la capital del país. En tercer lugar, se reflexiona sobre las ventajas, desventajas y características que tienen los dispositivos para la captación de agua y lluvia. Finalmente, se analiza el potencial de captación de la CDMX y se evalúan los costos y los beneficios de la implementación de la tecnología desarrollada por la UPIITA-IPN como alternativa para la captación de agua de lluvia, la cual puede reducir la desigualdad presente en el acceso al agua en la CDMX, dada su viabilidad económica.

Problemáticas del agua en el mundo y en México

Se estima que los requerimientos de agua dulce en el mundo ascienden a más de cuatro billones de litros/año, siendo el uso agrícola el mayor consumidor de este recurso con un 69% del consumo total de agua a nivel mundial. El uso industrial es el segundo más importante con un 19%¹ del total, seguido del doméstico con un 12% (UN-Water, 2019). Esto pone en evidencia que el acceso al agua es un elemento clave para el desarrollo. Sin embargo, el incremento en la población total mundial, se ha traducido en un aumento acelerado de la demanda de agua, la cual cada vez es más difícil de atender, incrementándose el desigual acceso a este vital recurso, viéndose en particular afectados los grupos más vulnerables.

En el último siglo, la población mundial se incrementó 4.4 veces, mientras que la extracción de agua aumentó 1.7 veces más rápido que la población mundial. A pesar de ello, tres de cada diez personas carecen de acceso al agua en cantidad y calidad

1. De esta cantidad, más de la mitad se utiliza en las centrales termoeléctricas para sus procesos de enfriamiento (FAO, 2018).

que permita garantizar un consumo humano seguro, estimándose que 70% de la población que se encuentra en esta situación reside en las zonas rurales. Esto pone en evidencia las condiciones de desigualdad presentes no sólo al interior de las zonas urbanas, sino entre las ciudades y la zona rural (UN-Water, 2019).

Por otro lado, seis de cada diez personas a nivel mundial, es decir, 4,400 millones, carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura, lo que ha provocado la muerte de 361,000 niños menores de cinco años anualmente, a causa de padecimientos que pueden prevenirse como la diarrea, la disentería y la tifoidea (UN-Water, 2019).

Los problemas asociados a la escasez del agua ya representan un riesgo para la población mundial, estimándose que cerca de 3,600 millones de personas en el mundo, es decir, casi la mitad de las personas en el mundo, se encuentran viviendo en áreas que potencialmente pueden verse afectadas por la falta de este recurso por lo menos un mes al año. Esta cifra podría aumentar a entre 4,800 y 5,700 millones de personas para el año 2050, resultado del cambio climático y la contaminación de las fuentes de agua (UN-Water, 2019), lo que pone en evidencia la urgencia para desarrollar mecanismos alternativos que mejoren la gestión ante un contexto de creciente incertidumbre con respecto al acceso y a la calidad del agua. Entre las estrategias que actualmente se discuten a nivel mundial como fuentes alternativas para mejorar el acceso al agua destacan la reutilización de las aguas residuales tratadas, la desalinización, y la captación y uso del agua pluvial (Zhang *et al.*, 2017; Eroksuz y Rahman, 2010; Sosa-Rodríguez, 2010; Sosa-Rodríguez *et al.*, 2018; Nolde, 2007).

En el caso de México, se ha incrementado la vulnerabilidad hídrica por la falta de una Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) que promueva no sólo un uso más eficiente de este recurso, sino que garantice la conservación de las fuentes de agua y evite la contaminación tanto de las aguas superficiales como de las aguas subterráneas. Por otro lado, la disponibilidad de agua en el país se ha reducido de manera importante, ya que en el 2010 ésta ascendía a 4,090 m³/habitante/año, y para el 2030 se estima que será de 3,800 m³/habitante/año (CONAGUA, 2019). A pesar de ello, la disponibilidad del agua no es homogénea en el territorio nacional, donde 23 de las 32 entidades federativas sufren un estrés hídrico extremadamente alto, destacando los casos de Baja California Sur, Guanajuato, CDMX, Aguascalientes, y el Estado de México.

Con respecto al acceso a los servicios de agua y saneamiento en México, 95.3% de los hogares cuentan con acceso al suministro de agua directamente de la red, aunque el 4.7% restante tienen que recurrir al acarreo. Sin embargo, no necesariamente el acceso a este recurso es permanente, sólo 68.1% de los hogares reciben este vital recurso todo el día, mientras que el 25.5% restante una o dos veces a la semana, pero 4.7% carece de este vital líquido por lo que tienen que acarrearla de otras viviendas, de una llave pública, de pozos, ríos, arroyos, lagos, lagunas o por medio de pipas. Al igual que a nivel mundial, las zonas rurales son las más afectadas por problemas de acceso al agua o su intermitencia, en el caso de México, 87% de los hogares en la zona

rural tienen acceso al agua directamente de la red, pero sólo 53% cuentan con un acceso permanente (INEGI, 2022a) (Tabla 1). La Tabla 1 detalla el acceso al agua que tienen los hogares en México y su frecuencia.

Existen importantes contrastes en la realidad nacional, siendo los estados de Guerrero, Oaxaca y Chiapas los más afectados por la falta de cobertura (con un 70% del total de los hogares); mientras que el caso de la CDMX, Nuevo León, Aguascalientes, Coahuila, y Colima, más de 97% de los hogares reciben agua directamente de la red. Con respecto al acceso al alcantarillado 97.4% de la población urbana y 77.5% de la rural tienen acceso; aunque 10.5 millones carecen de este servicio, lo que ha contribuido a que se generen 5,521 casos de diarrea por cada 100,000 habitantes, por la ingesta de agua contaminada (CONAGUA, 2022). Bajo este contexto, identificar alternativas sustentables para el abastecimiento de agua es una actividad prioritaria de analizar en México. Por lo pronto, la captación de lluvia permite ahorrar entre 10% y 15% del volumen de agua consumido en los hogares (INEGI, 2022b), mejorando el acceso al agua que tienen los hogares que suelen carecer de conexión a la red y que se encuentran en condiciones de marginación. Por otro lado, la desigualdad en el acceso no sólo se refiere a la falta de conexión a la red pública, sino también a la intermitencia con la que este vital líquido se recibe en cada hogar. En general, los hogares que enfrentan condiciones severas de pobreza se ven más afectados por la prestación de un servicio de agua intermitente, teniendo acceso a este recurso una vez por semana o con una menor frecuencia.

Tabla 1. Acceso al agua y frecuencia.

Total de hogares nacional	Total que reciben agua	Diario	Cada tercer día	Dos veces por semana	Una vez por semana	De vez en cuando	No recibe
	%						
32,925,270	95.3	68.1	13.2	5.3	4.0	3.1	4.7

Fuente: (INEGI, 2022a).

Problemáticas del agua en la Ciudad de México

La CDMX comprende 16 alcaldías, en donde reside una población de 8.9 millones de habitantes. De acuerdo con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), una persona en la CDMX consume en promedio 307 litros de agua al día; cifra que es considerablemente superior a los 150 litros/día que recomienda la OMS (OMS, 2018). Sin embargo, existen importantes diferencias con respecto al consumo, dado que mientras algunas colonias en la alcaldía Miguel Hidalgo consumen más de mil litros/habitantes/día, los residentes de Iztapalapa sólo tienen acceso a 20 litros/día; situación que pone en evidencia la marcada desigualdad en el acceso al agua en la CDMX (Sosa-Rodríguez, 2010; Sosa-Rodríguez *et al.*, 2018).

Para atender la creciente demanda de agua en la capital del país, se suministran 31.7 m³ proveniente de fuentes internas y externas: 41.95% del total del caudal es abastecido por el acuífero Valle de México, y el 58.05% restante es suministrado por el Sistema Cutzamala y por el Sistema Lerma (Sosa-Rodríguez *et al.*, 2018). Por lo pronto, el gran volumen extraído (507.36 hm³/año) del acuífero Valle de México supera casi al doble el volumen de recarga natural, enfrentando severas condiciones de sobreexplotación. Esta práctica poco sustentable ha favorecido la subsidencia de la zona centro y oriente de la Ciudad, provocando la ruptura o dislocamiento de las redes de agua y drenaje, además de exponer a la ciudad a inundaciones (Sosa-Rodríguez, 2010).

Otro factor importante es el promedio de vida de las tuberías de agua, ya que tienen más de 50 años de antigüedad, y desafortunadamente, esta infraestructura no ha sido rehabilitada. Por otro lado, el bajo tratamiento y reuso de las aguas residuales es otro problema que enfrenta la CDMX, ya que hasta el momento menos de 20% de las aguas residuales generadas recibe algún tratamiento, mientras que el 80% restante se desaloja sin tratamiento al Valle de Mezquital, siendo utilizada como agua para riego sin cumplir con la NOM-003; esta situación pone en riesgo la salud de los agricultores y de los consumidores. Las fugas también afectan el acceso al agua que reciben los capitalinos, ya que el volumen perdido por fugas supera el caudal abastecido por el Sistema Lerma o por el Sistema Cutzamala (Tabla 2).

Aunado a lo anterior, se estima que el 20% del volumen abastecido se pierde por tomas clandestinas, lo cual implica que sólo el 45% del volumen total importado y extraído del acuífero Valle de México, es abastecido efectivamente a los capitalinos. De este volumen, menos de 50% es pagado por los consumidores, por lo que el monto recaudado por el organismo operador no alcanzan a cubrir sus costos de mantenimiento y operación; esto se debe a que el precio promedio que pagan los usuarios por el agua es de 2 pesos/m³. Al mismo tiempo, la población en situación de marginación, sin acceso al agua y que recurren al acarreo, pagan casi 7 veces más por m³ consumido que el resto de la población (i.e., 15 pesos/m³ abastecido por pipas), lo que pone en evidencia una clara situación de desigualdad en el acceso (Tabla 2) (INEGI, 2022a).

Con respecto al servicio de agua, 98.69% de la población de la CDMX tiene acceso a este servicio: mientras el 90.6% del total de los capitalinos reciben un suministro de agua directamente de la red, el 9.4% restante carecen de este servicio: 63.49% adquiere este recurso por medio de pipas, 2.0% de pozos, 0.29% de ríos, arroyos o lagos y sólo un 0.28% resultado de la recolección del agua de lluvia (INEGI, 2022a) (Tabla 2). Bajo este contexto, el crecimiento poblacional acelerado, irregular y no planeado de la CDMX ha generado problemas de desabasto de agua que se traduce en cortes de agua y tandeo, así como una distribución asimétrica del agua (Perló, 2006). La Tabla 2 resume las principales problemáticas del acceso al agua, su disposición y tratamiento en la CDMX.

El desigual acceso al agua es una problemática que no sólo afecta de manera más severa algunas alcaldías como es el caso de Iztapalapa, en donde no sólo se carece de la infraestructura necesaria para atender la creciente demanda de agua por parte de

los hogares, sino que la calidad del agua que se recibe también se ha convertido en un factor relevante que limita un consumo humano seguro del volumen que se recibe, lo cual acentúa las condiciones de desigualdad. Sin embargo, no sólo esta alcaldía enfrenta problemas de desigual acceso al agua, también es importante destacar que algunas de las colonias de las alcaldías que reciben un mayor suministro de agua se ven afectadas por estas problemáticas; en estas colonias en general se identifican hogares en condiciones de pobreza, lo cual parecería ser una condición para que el servicio de agua que reciben sea deficiente y carezcan de la infraestructura para recibir un volumen de agua suficiente y con calidad.

Concepto	Valor	Concepto	Valor
Sobreexplotación de los acuíferos	120%	% volumen de agua consumido por el sector domestico	80%
Hundimiento anual	30 cm	Precio promedio del agua potable de uso doméstico	\$ 2 pesos/m ³
% de cuerpos de agua altamente contaminados	70%	Precio promedio del agua de pipa	\$ 15 pesos/m ³
% Agua residual tratada	20%	Precio promedio del agua de garrafón	\$ 1,000 – \$1750 pesos/m ³
% Agua potable que se pierde en fugas	35%	Precio promedio del agua embotellada	\$ 10 000 - \$25,000 pesos/m ³
% Volumen de agua importada	58%	Agua p del Sistema Cutzamala para la CDMX	13 m ³ /seg
% Tomas clandestinas existentes	20%	Agua que se fuga en la red	11m ³ /seg
% Cobro por agua suministrada de uso domestico	50%	Precio promedio del agua potable de uso doméstico	\$ 2 pesos/m ³

Tabla 2. Situación del acceso al agua, su disposición y su tratamiento en a CDMX.

Fuente: Sosa-Rodríguez, 2010, 2019; Sosa-Rodríguez et al., 2018; CONAGUA, 2022; INEGI, 2022.

Captación de lluvia: oportunidades y retos

La captación pluvial se puede definir como la recolección del escurrimiento de lluvia sobre una superficie para su aprovechamiento (Chiu *et al.*, 2009; Farreny *et al.*, 2011). También, puede funcionar adecuadamente para los nuevos desarrollos o grandes estructuras de la ciudad o zonas hoteleras que demandan cantidad de agua, y que los sistemas de captación de agua de lluvia pueden complementar sus requerimientos. La participación del gobierno y de la sociedad es clave para el éxito en la implementación de los SCALL, dado que el primero por medio de diversos programas puede subsidiar las instalaciones, así como lograr que el sistema llegue a más zonas.

Los SCALL constituyen sistemas diseñados para adaptarse fácilmente a los techos de las viviendas, los cuales funcionan a partir de canaletas que dirigen el agua hacia cisternas, donde pasan por un primer filtro que impide el paso de hojas y basura de mayor tamaño, además de separar las primeras aguas provenientes de la lluvia en las

cuales precipitan diversos contaminantes que pueden estar presentes en el aire y en la atmosfera (i.e., coliformes, metales). El uso de estos sistemas son una práctica común que cuenta con la regulación necesaria para su aprovechamiento para el consumo humano seguro en otros países como es el caso de Alemania, Australia, Singapur y Estados Unidos (WWAP, 2022). Desafortunadamente, en el caso de México, no se cuenta con la normatividad que regule la captación y el aprovechamiento del agua de lluvia, y por ende, tampoco existe una regulación que norme las características de los dispositivos y los procesos que debe seguir para garantizar que el agua colectada y tratada sea consumida de manera segura por la población, siendo una tarea pendiente relevante a abordar en el corto plazo, con el fin de ir desarrollando las condiciones para que los SCALL se conviertan de manera efectiva en una alternativa de acceso al agua, y por ende, una medida de adaptación para mejorar la seguridad hídrica. Por ejemplo, el agua de lluvia al caer se encuentra con superficies que contaminan su pureza, arrastrando contaminantes que pueden ser tóxicos. Otra posible fuente de contaminación es una atmósfera contaminada, en donde el agua de lluvia puede precipitar algunos de estos contaminantes, incluyendo metales pesados. De ahí, que sea importante que los SCALL tengan algún mecanismo que permita separar el agua durante los primeros minutos de lluvia o que los filtros instalados tengan la capacidad de remover una amplia gama de contaminantes (OMS, 2018). La lluvia ácida también es otra fuente de contaminación para estos sistemas (Fernández Pérez, 2009).

Sistema de captación pluvial y sus componentes

La calidad y el uso que tendrá el agua de lluvia colectada, así como el volumen de precipitación mensual y anual que se puede colectar y la extensión del área de captación son aspectos fundamentales a tener en cuenta al momento de definir el sistema de captación que se instalará. El correcto dimensionado de los SCALL permite almacenar durante los meses de más lluvia recursos suficientes para el resto del año, lo cual en el caso de la CDMX ocurre entre los meses de julio a septiembre. En general, los usos del agua pluvial comprenden tres grupos: (1) usos residenciales (i.e., para beber, cocinar y para el aseo personal); (2) usos no potables (i.e., lavado de ropa, descarga de inodoros y riego de jardín); y (3) uso de riego doméstico (i.e., huertas, jardines y árboles frutales). La elección de los usos de agua pluvial es un factor decisivo para determinar la demanda real que se tendrá que atender para satisfacer las necesidades de consumo y su factibilidad económica en el corto y mediano plazo. Los componentes esenciales de un sistema de captación para el aprovechamiento de las aguas pluviales comprenden (Colorado, 2015):

- Proceso de captación: que consiste en una serie de mecanismos coordinados para la captación y aprovechamiento.
- Área de captación: corresponde al lugar donde se almacenarán los escurrimientos de lluvia, incluyendo techos o estacionamientos impermeables.

- **Sistemas de conducción:** comprende el conjunto de canaletas que conducen el agua de lluvia hacia el área de almacenamiento; éstas aíslan el agua de la contaminación.
- **Sistema de tratamiento y filtración:** comprende un sistema de filtros que remueve la contaminación y desinfectan el agua.
- **Almacenamiento:** se refiere al sitio en donde se colecta el agua captada en el sistema; puede comprender tinacos, cisternas o algún otro elemento apto para el almacenamiento.

Al igual que otras alternativas de acceso al agua, los SCALL presentan tanto ventajas como desventajas que se abordarán a continuación.

Ventajas y desventajas de un sistema de captación pluvial

Las ventajas que otorga el uso de los SCALL son: por un lado, a nivel macro se busca la disminución del impacto ambiental que provoca la sobreexplotación de las cuencas y acuíferos, constituyendo una alternativa al abastecimiento de agua para la ciudad y zonas rurales donde la prestación de este servicio es costoso o precario; por otro lado, su implementación contribuye a la descentralización del sistema de agua. Otras de las ventajas de los SCALL es que permiten disminuir la cantidad de agua que escurre en zonas urbanas propensas a inundaciones, además que tienen una considerable flexibilidad y adaptabilidad para atender las necesidades concretas de las viviendas. Su bajo costo de instalación y sus altos beneficios, brindan autonomía en el uso de agua a los usuarios del sistema. En días de lluvia intensa, es posible coleccionar y tratar hasta 15,000 litros de agua de un techo de 100 metros cuadrados (Worm y Van Hattum, 2006).

No obstante, tiene como desventaja el elevado costo de su instalación cuando no existe la infraestructura necesaria. Asimismo, se debe considerar el hecho de que no se coleccionará agua pluvial todos los meses del año, por lo que la instalación debe tener particulares cuidados durante la temporada de estiaje. Otra desventaja se relaciona con la contaminación del agua de lluvia, la cual se debe tener en cuenta para la instalación de los mecanismos apropiados de tratamiento, además que no todo sitio es adecuado para su instalación, por lo que se requiere evaluar el área disponible para su captación y almacenamiento. La contaminación del agua por organismos patógenos puede estar presente en las instalaciones de recolección, almacenamiento, o la contaminación de los almacenamientos (Colorado, 2015). En el caso de la CDMX, es importante tener en cuenta que mala calidad del aire puede afectar la calidad del agua de lluvia que se colecciona. Sin embargo, los contaminantes presentes varían dependiendo de las actividades antropogénicas que se desarrollan en cada zona, de manera que los mecanismos de tratamiento que se requieren implementar deben tener en cuenta

el comportamiento de estos contaminantes a lo largo del año. En la siguiente sección de este capítulo, se analiza si la captación de agua de lluvia es una alternativa viable económica para la CDMX.

Viabilidad económica de la captación de agua de lluvia en la CDMX

Con el fin de determinar si la captación de agua de lluvia en la CDMX es una alternativa viable para mejorar el acceso al agua se realizó un Análisis Costo-Beneficio (ACB), que tomó en cuenta tanto el potencial de captación de la CDMX, los costos financieros asociados con la instalación y mantenimiento de los SCALL, como los beneficios económicos y co-beneficios ambientales. El ACB es un método que permite determinar, bajo una serie de procedimientos, la factibilidad de un proyecto, determinando tanto los costos como los beneficios directos e indirectos, proporcionando las bases para una mejor toma de decisiones. Este sentido, el análisis realizado contrasta los costos y beneficios económicos y ambientales del uso de un dispositivo de captación y tratamiento del agua de lluvia basado en un sistema de filtros, el cual potencialmente se podría implementar en la CDMX, aprovechando techos y vialidades. Para ello, se tomaron en cuenta dos escenarios posibles con respecto a la superficie de captación: una superficie mínima que sólo considera los techos de las viviendas y naves industriales en la CDMX (límite inferior); y una zona máxima de captación, que considera no sólo los techos y naves, sino también las vialidades (límite superior).

Se considera que el agua colectada se utilizará para usos que no requieren de agua potable (i.e., para beber o cocinar), por lo que el agua colectada puede ser utilizada para el riego de áreas verdes en la CDMX, la limpieza de calles y avenidas, y para el uso en sanitarios. Sin embargo, los filtros evaluados han demostrado cumplir con la NOM127 que regula la calidad del agua para el consumo humano en México, sin utilizar cloro como mecanismo de desinfección. Esto previene problemas en la salud por un mal manejo del cloro por parte de los usuarios de estos dispositivos, lo cual ha favorecido la presencia de organoclorados, identificados como compuestos cancerígenos (Thacker *et al.*, 2008).

Suministro y consumo de agua en la CDMX

De acuerdo con SACMEX (2018), en las alcaldías de la CDMX, el suministro per cápita asciende en promedio a 343.8 litros/día, pero no todo este caudal es consumido por la población. Se estima que el consumo promedio total es de 217.3 litros/día y el consumo doméstico *per cápita* es de 162.1 litros/día (Tabla 3); esta cifra cumple con el volumen mínimo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para garantizar la salud de la población definido en 150 litros/día; también satisface los requerimientos mínimos definidos por el Banco Mundial establecidos en 50 litros/día (OMS, 2009; WWAP, 2022). Resultado de dichos niveles de consumo, la recaudación anual por el servicio de agua en la CDMX asciende a 11,208.95 miles de

millones de pesos, con una tarifa promedio para el uso doméstico por m³ de 23.48 pesos (CONAGUA, 2022). A pesar de ello, más de la tercera parte de las demarcaciones y colonias que conforman a la CDMX realizan consumos muy por debajo de estas cifras, lo cual pone en evidencia los problemas de desigualdad en el acceso al agua que enfrentan los capitalinos. Por ejemplo, las alcaldías Tlalpan, Cuauhtémoc y Xochimilco realizan consumos menores a 77 litros/habitante/día; y Tláhuac, Milpa Alta e Iztapalapa entre 120 y 127 litros/día. Por otro lado, las alcaldías que realizan los mayores consumos *per cápita* en promedio son: Cuajimalpa y Miguel Hidalgo con consumos superiores a los 320 litros/día, seguidos por Coyoacán, Magdalena Contreras y Benito Juárez, con consumos superiores a 180 litros/día (Tabla 3).

Tabla 3. Consumo per cápita, pérdidas y pago por el servicio de agua en la CDMX.

Demarcación	Dotación	Consumo		Pérdidas	%	Consumo mensual	Consumo anual	Pago mensual	Pago anual
		Total	Doméstico						
		(l/hab/día)					(millones de m3)		
Azcapotzalco	342	228.68	161.44	113.32	33.13	2.01	24.10	47.16	565.92
Álvaro Obregón	349	181.44	151.82	167.56	48.01	3.31	39.74	77.75	933.01
Benito Juárez	477	302.97	181.46	174.03	36.48	2.10	25.18	49.27	591.20
Coyoacán	331	219.23	189.85	111.77	33.77	3.53	42.40	82.97	995.62
Cuauhtémoc	340	201.46	71.67	138.54	40.75	1.14	13.72	26.85	322.19
Cuajimalpa	657	359.38	331.58	297.62	45.30	1.85	22.25	43.53	522.41
Gustavo A. Madero	362	218.33	170.66	143.67	39.69	6.07	72.85	142.55	1,710.54
Iztacalco	333	218.57	154.96	114.43	34.36	1.79	21.44	41.95	503.41
Iztapalapa	242	161.96	127.33	80.04	33.07	6.94	83.23	162.86	1,954.32
Magdalena Contreras	434	331.01	188.52	102.99	23.73	1.35	16.23	31.75	380.99
Miguel Hidalgo	509	332.32	320.52	176.68	34.71	3.59	43.03	84.19	1,010.26
Milpa Alta	258	151.72	127.31	106.28	41.19	0.50	5.98	11.71	140.52
Tláhuac	198	144.18	120.01	53.82	27.18	1.30	15.56	30.46	365.46
Tlalpan	167	95.57	76.9	71.43	42.77	1.50	18.01	35.24	422.88
Venustiano Carranza	348	239.32	150.74	108.68	31.23	1.95	23.39	45.76	549.14
Xochimilco	153	90.57	68.72	62.43	40.80	0.86	10.27	20.09	241.07
CDMX	343.8	217.3	162.1	2023.29	36.6	39.78	477.38	934.08	11,208.95

Fuente: (SACMEX, 2018).

Cabe destacar, que las colonias en donde sus habitantes realizan consumos superiores a 200 litros/día se ubican en el centro de la CDMX, principalmente, en las alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc. Pero no son los residentes de estas colonias quienes realizan los mayores consumos en esta entidad, sino quienes viven en Miguel Hidalgo, Azcapotzalco y Álvaro Obregón, cuyos volúmenes son superiores a 3000 litros/día, como es el caso de las colonias Bosque de Chapultepec e Hipódromo de las Américas en Miguel Hidalgo; San Juan Tlihuaca e Industrial Vallejo en Azcapotzalco; y Las Américas, La Milagrosa y Santa Fe en Álvaro Obregón. Por otro lado, las colonias cuyos habitantes realizan consumos aún menores a 20 litros/día se concentran en las alcaldías Iztapalapa, Milpa Alta y Magdalena Contreras, destacando las colonias: San

José Buenavista, Ampliación Emiliano Zapata, Lomas de la Estancia, Palmitas y Xalpa en Iztapalapa; Tierra Unida y Potrerillo en Magdalena Contreras; San Bartolomé Xicomulco en Milpa Alta; 2 octubre en Tlalpan, y Tierra Blanca en Tláhuac (SACMEX, 2018). Con base en el patrón de distribución del acceso al agua, es evidente que se favorece al centro de la capital del país en detrimento de su periferia. Estas divergencias se explican por diferencias en la infraestructura y el equipamiento urbano. Para determinar la rentabilidad de la instalación de estos sistemas de captación se requiere conocer la precipitación total acumulada anual y su distribución espacial, con el fin de conocer en qué medida podría contribuir la captación de agua de lluvia para atender la demanda de agua de los capitalinos.

Costos de inversión, instalación, operación y mantenimiento

Para el ACB es necesario considerar los costos de inversión para la adquisición de los sistemas de captación, filtración y desinfección del agua, así como los gastos asociados a la operación y mantenimiento de estos dispositivos. Los costos para un sistema de captación de lluvia suelen variar por las características del inmueble en que se quiera colocar, a continuación, se estiman estos costos utilizando como referente el filtro desarrollado en el Instituto Politécnico Nacional (IPN). Este sistema consiste en un filtro de dos etapas (i.e., filtro de primeras lluvias y pulido), donde en el caso de la primera etapa se tiene un empaquetamiento con tres materiales convencionales entre los que se encuentran una zeolita y carbón activado; mientras que el segundo filtro básicamente contiene una resina acondicionada para la remoción de iones, partículas muy finas y compuestos orgánicos diluidos. Los resultados de la remoción de contaminantes del agua de lluvia del uso de este dispositivo permiten su uso como agua potable, dado que remueve iones metálicos, aniones (halogenuros), materia orgánica básica, grasas, compuestos recalcitrantes, así como partículas finas y suspendidas, todos estos contenidos de manera diluida en el agua de lluvia sin necesidad de utilizar cloro para la desinfección. Sin embargo, en el ACB realizado se evalúa la viabilidad económica de este dispositivo para la colecta, tratamiento y uso del agua de lluvia con fines no potables, dado que es la aplicación para la cual actualmente se emplea este dispositivo y con base en la cual se registró la información de campo.

Este dispositivo se utiliza en techos y tienen un costo de 2,100 pesos. Los costos de mantenimiento, los cuales comprenden la renovación del material filtrante cada seis meses ascienden a 600 pesos, pero dicha renovación puede evitarse, si el usuario hace un retro lavado del mismo; para fines de este capítulo se considerarán ambas alternativas. Finalmente, el funcionamiento del dispositivo no requiere de energía eléctrica (Tabla 4). Se evalúa la viabilidad económica de implementar este dispositivo en la CDMX, debido a que dispositivos similares no cumplen con las especificaciones para ser consideradas como sustentables por problemas relacionados con un mal manejo de cloro que puede poner en riesgo la salud de los usuarios o porque son mucho más costosos.

Con respecto al sistema de almacenamiento y de conducción, se requiere de una red de conducción y la construcción de canaletas elaboradas de diferentes materiales, así como un tinaco de 750 litros. Los gastos de inversión con respecto a la instalación del sistema de la red de conducción para una superficie de aproximadamente 400 m², se estiman entre 850 y 1,250 pesos; adicionalmente se requieren 1,500 pesos con respecto al costo del tinaco de 750 litros. La limpieza del tinaco y de la red de conducción se espera se realice dos veces al año, con un costo por limpieza de 500 pesos (Tabla 4). La Tabla 4 detalla los gastos de inversión, así como los de mantenimiento y operación (M&O). Teniendo en cuenta lo anterior, los gastos de inversión ascienden entre \$2,350 y \$2,750 pesos; mientras que los gastos de M&O ascienden entre \$1,000 y \$2,200 pesos. Por lo tanto, los costos totales de instalación y de M&O del dispositivo se encuentran entre \$3,350 y \$4,950 pesos.

Tabla 4. Gastos de inversión, de operación y mantenimiento.

Concepto	Costos mínimos	Costos máximos
Gastos de inversión		
Tinaco 750 litros	\$1,500	\$1,500
Red de conexión y preparación de la superficie de captación	\$850	\$1,250
Subtotal	\$2,350	\$2,750
Gastos de mantenimiento y operación		
Renovación del material filtrante	\$0	\$1,200
Limpieza del tinaco y de la red de conducción	\$1,000	\$1,000
Subtotal	\$1,000	\$2,200
Total	\$3,350	\$4,950

Fuente: Elaboración propia.

Beneficios

En relación con los beneficios se contabilizaron tanto los directos como los indirectos. Entre los beneficios directos se encuentran los ahorros en los pagos por el servicio de agua, debido a un menor consumo. Por otro lado, entre los beneficios indirectos se encuentran los ahorros en el consumo de energía eléctrica, la reducción en la generación de GEI y los ahorros en la recarga del acuífero. La estimación de estos beneficios directos e indirectos se detalla a continuación.

Captación potencial del agua de lluvia

La precipitación es la caída de agua meteórica en la superficie de una zona de la tierra determinada, a través de lluvia, llovizna (formas líquidas), nieve, granizo (sólida), rocío, helada blanca (precipitaciones ocultas) y neblina (precipitación horizontal) (Pucha-Cofrep *et al.*, 2017); esta es provocada por un cambio en la presión o de temperatura

(Alatorre Cejudo, 2015) y se mide en milímetros (mm). Para la modelación de la distribución espacial de la precipitación en un territorio (y un periodo determinado), se requiere de las bases de datos de precipitación diaria en mm por estación climática, la cual alimenta a un Sistema de Información Geográfica (SIG) para conocer con detalle su distribución. Con este fin, se utiliza la interpolación de la información para calcular las isoyectas. En este capítulo se presentan los resultados de dichas interpolaciones por demarcación territorial de manera mensual y anual, considerando una superficie mínima y máxima de captación. En el caso de la superficie mínima, sólo se considera la instalación de estos dispositivos en los techos de las viviendas con uso doméstico; mientras que en el caso de la captación máxima se tomaron en cuenta los techos de zonas residenciales, comerciales e industriales, así como las áreas verdes y vialidades. La interpolación se basa en el principio de la dependencia espacial, estimándose con base en la autocorrelación espacial (Pucha-Cofrep *et al.*, 2017; Fuenzalida *et al.*, 2015); aunque existen diferentes métodos de interpolación, se seleccionó el método de IDW.

Para tener mayor certeza sobre el comportamiento de la precipitación en la CDMX se utilizaron las normales climáticas del periodo comprendido de 1981 al 2010, estimándose a partir de la información sobre la precipitación colectada por medio de 323 estaciones climáticas en las 16 alcaldías. Para ello, se realizaron 13 rasters de las isoyectas correspondientes a cada mes del año y la precipitación anual. Con base en las isoyectas que se obtuvieron, se identificaron las áreas con las mismas propiedades de precipitación con base en los cuales se estimaron los m³ que podrían ser potencialmente captados, considerando un área de captación mínima y máxima, como fue previamente descrito. El volumen máximo anual de agua pluvial que potencialmente podría ser captado en la CDMX asciende a 1,444.36 millones de m³, lo cual podría satisfacer el consumo doméstico de agua realizado por los capitalinos anualmente en poco más de tres veces; incluso el volumen mínimo que podría ser captado asciende a 442.85 millones de m³ al año; cifra que podría atender 92.8% de los requerimientos de agua de los hogares de la CDMX. Estos resultados ponen en evidencia, que la captación de agua pluvial en la CDMX constituye una alternativa técnicamente viable, capaz de abastecer casi por completo los requerimientos anuales de agua de la CDMX, si esta es almacenada durante el periodo de lluvia y distribuida el resto del año para atender la demanda de los habitantes de esta entidad. De promoverse el uso de los SCALL como una fuente de agua alternativa, la importación de agua del Sistema Lerma-Cutzamala o de la extracción del acuífero Valle de México se reducirá, permitiendo que la CDMX cuente con un volumen de agua que pueda ser utilizado en situaciones de emergencia (Tabla 5).

Las demarcaciones con el mayor potencial de captación son Milpa Alta (entre 110.97 - 336.08 millones de m³); seguida por Tlalpan (entre 113.94 - 353.92 millones de m³). Estas son dos de las demarcaciones identificadas como de las más afectadas por la falta de agua, junto con Iztapalapa (23.67- 87.75 millones de m³) y Tláhuac (20.63 -

66.89 millones de m³), en cuyos casos la captación de agua de lluvia podría atender desde 28.4% del consumo doméstico (i.e., Iztapalapa) hasta varias veces sus requerimientos (Tabla 5).

Con base en la captación de agua pluvial estimada, se calcularon los co-beneficios resultado de los ahorros por el pago del servicio de agua, por la reducción en el consumo de energía en los trasvases y en la extracción de agua del acuífero Valle de México y por una menor generación de GEI. Los cálculos de los co-beneficios se detallan a continuación.

Beneficios directos e indirectos

Los beneficios directos se estimaron con base en los ahorros por el pago del servicio de agua resultado de los volúmenes captados (Tabla 5); para ello, se utilizó la tarifa de agua doméstica promedio reportada por la CONAGUA (2018) para la CDMX que asciende a \$23.48 pesos/m³. Los ahorros por el pago del servicio de agua se estimaron entre \$4,885.98 y \$10,625.68 millones de pesos al año para la CDMX. Cabe mencionar, que los mayores ahorros en términos del pago del servicio de agua derivado de la colecta y aprovechamiento del agua de lluvia, no necesariamente se realizan en las demarcaciones en donde se presenta la mayor colecta de este recurso. Lo anterior, debido a que dichas demarcaciones tienen un menor tamaño poblacional, y por ende, el consumo total en la misma, es menor. A pesar de ello, volúmenes adicionales de agua que sean captados en estas demarcaciones, los cuales superan sus requerimientos, pueden favorecer su aprovechamiento en otros usos que apoyen la conservación de las fuentes de agua en la CDMX como, por ejemplo, en la recarga artificial de los acuíferos o en la creación de intervenciones basadas en la infraestructura hídrica verde, que potencien los servicios ecosistémicos y la recuperación de espacios verdes en la CDMX. En esta situación se encuentra Iztapalapa, en cuyo caso los ahorros están entre \$555.84 a \$1,954.32 millones de pesos al año, seguida por la Gustavo A. Madero con un monto entre \$377.83 a \$1,400.39 millones de pesos al año y Álvaro Obregón entre \$635.80 a \$933.01 millones de pesos al año (Tabla 7).

Con respecto a los co-beneficios asociados a los ahorros de los costos operativos y de mantenimiento por la colecta del agua de lluvia, la CDMX estaría ahorrando entre \$3,387.83 y \$11,049.34 millones de pesos al año. Estos ahorros estimados en \$7.65 pesos/m³ consideran los pagos por derechos de agua (\$0.23 pesos/m³), el pago del agua en bloque (\$2.74 pesos/m³), los gastos en energía tanto por los requerimientos energéticos para el trasvase del Sistema Lerma-Cutzamala y los gastos asociados al bombeo de agua del acuífero Valle de México (\$0.64 pesos/m³), los gastos relacionados con el pago del personal (\$1.71 pesos/m³), otros gastos de operación y mantenimiento de la infraestructura (\$1.86 pesos/m³), y los pagos por derechos de descargas (\$0.46 pesos/m³). Las demarcaciones que mayores ahorros en materia de operación y mantenimiento son aquellas con el mayor potencial de captación, destacando el caso de Tlalpan con ahorros entre \$871.68 y \$2,707.46 millones de pesos/año y Milpa

Alta entre \$848.94 y \$2,571.04 millones de pesos/año (Tabla 6). En la misma situación se encuentran los ahorros de inversión y rehabilitación, los cuales para el caso de Tlalpan ascienden entre \$273.33 a \$845.86 millones de pesos/año y para Milpa Alta entre \$265.23 y \$803.24 millones de pesos/año; para la CDMX estas cifras representan potenciales ahorros entre \$1,058.42 y \$3,452.02 millones de pesos/año (Tabla 7).

Con respecto a los ahorros por la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), con base en la menor energía requerida para los trasvases de agua del Sistema Lerma-Cutzamala y la menor energía requerida para el bombeo de agua de los pozos de la Ciudad, éstos ascienden entre \$88.83 y \$289.72 millones de pesos/año; dichos ahorros son mayores en las demarcaciones en donde se tienen las mayores colectas de agua, como son Tlalpan (con montos entre \$22.86 y \$70.99 millones de pesos/año) y de Milpa Alta (con montos entre \$22.26 y 67.41 millones de pesos/año). Con base en los beneficios abordados previamente, la colecta de agua de lluvia en la CDMX potencialmente podría representar ahorros entre \$9,421.05 y \$25,416.75 millones de pesos/año (Tabla 7). Cabe destacar, que el presupuesto asignado a SACMEX en el año 2020 fue de 15,581 millones de pesos, por lo cual estos ahorros representarían por lo menos 60.46% del presupuesto total recibido por SACMEX (Congreso de la CDMX, 2019). La Tabla 6 detalla los costos operativos, de mantenimiento, de inversión y rehabilitación estimados por m³; mientras que la Tabla 7 describe los co-beneficios asociados con los ahorros por el pago del servicio de agua, por los costos M&O, de inversión y rehabilitación, y de mitigación.

Tabla 6. Costos operativos, de mantenimiento, de inversión y rehabilitación.

Costos	Pesos/m ³
Derechos agua	0.23
Agua en bloque	2.74
Energía	0.64
Personal	1.71
Otros operación y mantenimiento	1.86
Derechos de descarga	0.46
Inversión y rehabilitación	2.39
Costo racionamiento agua	8.59
Ahorros de mitigación	0.20
Costos totales de mantenimiento y operativos	7.65

Fuente: Elaboración propia con base en BM (2013), SACMEX (2018).

Análisis de rentabilidad

Los indicadores de rentabilidad para el ACB sobre la colecta, tratamiento y reúso del agua pluvial tomaron en cuenta los costos de la instalación, M&O del sistema de colecta y tratamiento, así como los beneficios y co-beneficios resultado del uso de estos dispositivos. La estimación de los beneficios fue previamente desarrollada e incluyó los ahorros por el pago del servicio de agua, los ahorros de los costos operativos y de mantenimiento del sistema, y las contribuciones en materia de mitigación. En el

caso de los costos, se consideraron los costos asociados a la instalación del sistema propuesto de captación y filtración del agua de lluvia, el cual se estimó considerando un área de captación promedio de 200 m². Para determinar el costo de implementar estos dispositivos en la CDMX se tomaron en cuenta las viviendas existentes en la capital de país, considerando que en cada una de ellas se instalaría dicho dispositivo, además de la instalación en vialidades y en áreas verdes. Los costos asociados se detallan en la Tabla 8, con base en la cual se estima el costo total de instalar estos dispositivos en la CDMX entre 21,405.45 y 31,628.95 millones de pesos; las demarcaciones que mayores costos tendrán para la instalación de estos dispositivos son Tlalpan y Milpa Alta, debido a las mayores extensiones de áreas verdes con montos que alcanzan los 5,418.36 y 4,626.40 millones de pesos, respectivamente. Otras de las demarcaciones con los mayores costos por la instalación de estos dispositivos son Iztapalapa y Gustavo A. Madero, resultado de su mayor concentración demográfica, y por ende, del mayor número de viviendas en su territorio; dichos costos alcanzan cifras de 3,445.78 y 2,496.01 millones de pesos, respectivamente. Cabe mencionar, que los mayores costos corresponden a los gastos de adquisición e instalación de los dispositivos de captación y filtración, los cuales representan una proporción de entre 56 y 70%; mientras que, en el caso de los gastos de operación y mantenimiento, estos se encuentran entre un 30 y 44% de los costos totales (Tabla 8).

Entre los indicadores de rentabilidad utilizados para analizar la viabilidad económica de instalar los sistemas de captación y filtración se encuentran:

- El *Valor Actual Neto (VAN)*: este indicador expresa una medida de rentabilidad en términos absolutos netos. Cuando el VAN del proyecto de inversión analizado es positivo ($VAN > 0$), nos indica que el proyecto generará beneficios para la CDMX, más allá del retorno del capital invertido en el proyecto. Por otro lado, si el $VAN < 0$, el proyecto de inversión analizado no es rentable.
- La *Tasa Interna de Retorno (TIR)*: es la tasa de interés o rentabilidad que ofrece una inversión, por ende, es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. Debido a que se usa una tasa de interés por el financiamiento del proyecto de 12%, la cual corresponde a la tasa que emplea la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para evaluar los proyectos de inversión en el sector agua, si la $TIR > 12\%$, se considera que el proyecto es rentable; en caso contrario, si la $TIR < 12\%$, el proyecto no es rentable.
- El *Periodo de recuperación de la inversión*: es un instrumento que permite medir el plazo de tiempo que se requiere para que los flujos netos de efectivo de una inversión recuperen su costo o inversión inicial.

Tabla 7. Volumen máximo y mínimo per cápita diario de agua de lluvia que potencialmente podría ser captado en la CDMX.

Demarcación/ Mes	Volumen máximo que potencialmente puede ser captado (millones de m³)													Consumo anual	
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	(millones de m³)	%
Azcapotzalco	0.22	0.30	0.29	0.65	1.80	4.67	5.35	5.02	4.41	1.54	0.39	1.03	25.66	24.1	106.5
Álvaro Obregón	0.82	0.76	0.85	1.97	6.23	16.11	19.63	19.02	16.54	4.96	1.22	3.81	91.91	39.74	231.3
Benito Juárez	0.20	0.19	0.27	0.41	1.51	3.88	4.64	4.39	3.88	1.42	0.34	0.81	21.93	25.18	87.1
Coyoacán	0.44	0.31	0.53	1.23	3.25	8.12	9.87	9.45	8.65	2.68	0.66	1.70	46.89	42.4	110.6
Cuauhtémoc	0.22	0.26	0.31	0.64	1.71	4.46	5.25	4.88	4.25	1.46	0.40	0.96	24.80	13.72	180.7
Cuajimalpa	0.70	0.68	0.71	1.56	5.11	12.53	16.29	15.92	13.33	3.97	1.02	4.02	75.84	22.25	340.9
Gustavo A. Madero	0.58	0.74	0.69	1.73	4.22	10.99	12.39	11.42	9.79	3.65	1.07	2.36	59.64	72.85	81.9
Iztacalco	0.13	0.18	0.22	0.46	1.23	3.15	3.86	3.46	3.01	1.15	0.34	0.78	17.94	21.44	83.7
Iztapalapa	0.88	0.79	1.08	2.23	6.06	15.48	18.72	17.11	15.19	5.60	1.56	3.06	87.75	83.23	105.4
Magdalena Contreras	0.59	0.50	0.58	1.31	4.46	11.19	13.64	14.10	12.32	3.62	0.87	4.07	67.23	16.23	414.2
Miguel Hidalgo	0.32	0.40	0.41	0.88	2.62	6.81	6.66	7.72	6.65	2.41	0.53	2.74	38.14	43.03	88.6
Milpa Alta	3.44	2.58	2.60	5.96	20.17	61.79	70.43	69.35	64.26	17.74	4.46	13.28	336.08	5.98	5620.1
Tláhuac	0.69	0.56	0.77	1.65	4.57	11.93	14.20	13.29	11.76	3.78	1.04	2.63	66.89	15.56	429.9
Tlalpan	3.25	2.26	3.29	8.00	22.65	62.32	75.00	73.43	66.56	18.59	4.49	14.07	353.92	18.01	1965.1
Venustiano Carranza	0.24	0.22	0.31	0.67	1.72	4.55	4.21	4.81	4.16	1.50	0.49	2.22	25.11	23.39	107.3
Xochimilco	0.97	0.61	0.99	2.25	7.05	18.50	22.10	20.87	19.49	5.79	1.45	4.56	104.64	10.27	1018.9
CDMX	13.70	11.34	13.88	31.62	94.35	256.46	302.24	294.26	264.25	79.84	20.34	62.09	1,444.36	477.38	302.6

Demarcación/ Mes	Volumen mínimo que potencialmente puede ser captado (millones de m³)													Consumo anual	
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	(millones de m³)	%
Azcapotzalco	0.06	0.08	0.08	0.17	0.47	1.22	1.40	1.31	1.15	0.40	0.10	0.27	6.71	24.1	27.8
Álvaro Obregón	0.24	0.22	0.25	0.58	1.83	4.74	5.77	5.60	4.86	1.45	0.36	1.18	27.08	39.74	68.1
Benito Juárez	0.05	0.05	0.07	0.14	0.39	0.99	1.18	1.12	0.99	0.36	0.09	0.17	5.59	25.18	22.2
Coyoacán	0.06	0.08	0.15	0.34	0.89	2.21	2.69	2.57	2.35	0.73	0.18	0.52	12.76	42.4	30.1
Cuauhtémoc	0.12	0.07	0.22	0.16	0.43	1.13	1.33	1.24	1.08	0.37	0.10	0.04	6.29	13.72	45.8
Cuajimalpa	0.22	0.21	0.08	0.49	1.60	4.18	5.11	4.99	4.18	1.24	0.32	1.15	23.77	22.25	106.8
Gustavo A. Madero	0.16	0.20	0.18	0.47	1.14	2.96	3.34	3.08	2.64	0.98	0.29	0.65	16.09	72.85	22.1
Iztacalco	0.04	0.04	0.06	0.12	0.31	0.79	0.97	0.87	0.75	0.29	0.09	0.19	4.51	21.44	21.0
Iztapalapa	0.24	0.21	0.29	0.60	1.63	4.18	5.05	4.62	4.10	1.51	0.42	0.82	23.67	83.23	28.4
Magdalena Contreras	0.20	0.16	0.18	0.41	1.41	3.73	4.55	4.46	3.89	1.14	0.28	0.84	21.25	16.23	130.9
Miguel Hidalgo	0.09	0.11	0.11	0.24	0.72	1.87	2.22	2.12	1.83	0.66	0.15	0.36	10.48	43.03	24.4
Milpa Alta	1.14	0.85	0.86	1.97	6.66	20.41	23.26	22.90	21.22	5.86	1.47	4.38	110.97	5.98	1855.7
Tláhuac	0.21	0.19	0.24	0.51	1.41	3.68	4.38	4.10	3.63	1.16	0.32	0.80	20.63	15.56	132.6
Tlalpan	1.05	0.73	1.06	2.58	7.28	20.07	24.14	23.66	21.43	5.98	1.44	4.52	113.94	18.01	632.7
Venustiano Carranza	0.06	0.07	0.08	0.18	0.45	1.20	1.40	1.26	1.09	0.40	0.13	0.27	6.61	23.39	28.2
Xochimilco	0.30	0.20	0.31	0.70	2.19	5.75	6.87	6.48	6.05	1.80	0.45	1.40	32.50	10.27	316.4
CDMX	4.23	3.48	4.20	9.64	28.80	79.09	93.65	90.39	81.26	24.34	6.18	17.58	442.85	477.38	92.8

Fuente: Elaboración propia con base en lo estimado en el Sistema de Información Geográfico (SIG) construido.

Tabla 8. Co-beneficios por la captación del agua de lluvia.

Demarcación	Ahorros por pago del servicio de agua			Ahorros de costos operativos y de mantenimiento				Ahorros de inversión y rehabilitación (millones de pesos)				Ahorros por costos de mitigación			Co-beneficios totales		
	Mín	Prom	Máx	Mín	Mín	Mín	Prom	Máx	Prom	Máx	Mín	Mín	Prom	Máx	Mín	Prom	Máx
Azcapotzalco	157.47	361.70	565.92	16.03	16.03	16.03	38.67	61.32	38.67	61.32	1.35	3.25	5.15	226.15	527.40	828.65	
Álvaro Obregón	635.80	784.40	933.01	64.72	64.72	64.72	142.19	219.66	142.19	219.66	5.43	11.93	18.44	913.10	1,393.66	1,874.22	
Benito Juárez	131.19	323.04	514.88	13.35	13.35	13.35	32.88	52.41	32.88	52.41	1.12	2.76	4.40	188.41	463.93	739.44	
Coyoacán	299.68	647.65	995.62	30.50	30.50	30.50	71.29	112.07	71.29	112.07	2.56	5.98	9.41	430.39	953.10	1,475.81	
Cuauhtémoc	147.69	234.94	322.19	15.03	15.03	15.03	37.15	59.27	37.15	59.27	1.26	3.12	4.97	212.10	394.12	576.14	
Cuajimalpa	522.41	522.41	522.41	56.81	56.81	56.81	119.04	181.27	119.04	181.27	4.77	9.99	15.21	765.83	1,032.47	1,299.11	
Gustavo A. Madero	377.83	889.11	1,400.39	38.46	38.46	38.46	90.50	142.54	90.50	142.54	3.23	7.60	11.96	542.62	1,276.89	2,011.15	
Iztacalco	105.94	263.59	421.24	10.78	10.78	10.78	26.83	42.88	26.83	42.88	0.91	2.25	3.60	152.14	378.55	604.96	
Iztapalapa	555.84	1,255.08	1,954.32	56.58	56.58	56.58	133.15	200.71	133.15	200.71	4.75	11.17	17.60	798.27	1,825.58	2,852.80	
Magdalena Contreras	380.99	380.99	380.99	50.78	50.78	50.78	105.73	160.67	105.73	160.67	4.26	8.87	13.48	598.56	834.00	1,069.43	
Miguel Hidalgo	246.07	570.85	895.64	25.05	25.05	25.05	58.11	91.17	58.11	91.17	2.10	4.88	7.65	353.39	819.83	1,286.26	
Milpa Alta	140.52	140.52	140.52	265.23	265.23	265.23	534.23	803.24	534.23	803.24	22.26	44.84	67.41	1,276.95	2,429.58	3,582.21	
Tláhuac	365.46	365.46	365.46	49.32	49.32	49.32	104.59	159.86	104.59	159.86	4.14	8.78	13.42	576.76	813.60	1,050.43	
Tlalpan	422.88	422.88	422.88	272.33	272.33	272.33	559.09	845.86	559.09	845.86	22.86	46.92	70.99	1,589.74	2,818.47	4,047.19	
Venustiano Carranza	155.12	352.13	549.14	15.79	15.79	15.79	37.90	60.01	37.90	60.01	1.33	3.18	5.04	222.77	514.51	806.25	
Xochimilco	241.07	241.07	241.07	77.67	77.67	77.67	163.87	250.08	163.87	250.08	6.52	13.75	20.99	573.85	943.23	1,312.61	
CDMX	4,885.98	7,755.83	10,625.68	3,387.83	7,218.58	11,049.38	2,255.24	3,452.02	2,255.24	3,452.02	88.83	189.27	289.72	9,421.05	17,418.90	25,416.75	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Costos de instalación, mantenimiento y operación de los sistemas de captación y filtración para la Ciudad de México.

Demarcación	Gastos de inversión			Gastos de mantenimiento y operación (millones de pesos)			Gastos totales		
	Min	Prom	Máx	Min	Prom	Máx	Min	Prom	Máx
Álvaro Obregón	1,011.75	1,097.86	1,183.96	430.53	688.85	947.17	1,442.28	1,786.71	2,131.13
Azacapotzalco	416.24	451.67	487.09	177.12	283.40	389.67	593.36	735.06	876.76
Benito Juárez	483.58	524.73	565.89	205.78	329.24	452.71	689.35	853.98	1,018.60
Coyoacán	728.61	790.62	852.63	310.05	496.07	682.10	1,038.65	1,286.69	1,534.73
Cuajimalpa de Morelos	776.11	842.17	908.22	330.26	528.42	726.58	1,106.38	1,370.59	1,634.79
Cuauhtémoc	575.77	624.78	673.78	245.01	392.02	539.02	820.78	1,016.79	1,212.80
Gustavo A. Madero	1,184.97	1,285.82	1,386.67	504.24	806.79	1,109.34	1,689.22	2,092.61	2,496.01
Iztacalco	359.24	389.82	420.39	152.87	244.59	336.31	512.11	634.41	756.70
Iztapalapa	1,635.88	1,775.10	1,914.32	696.12	1,113.79	1,531.46	2,331.99	2,888.89	3,445.78
Magdalena Contreras	875.39	949.89	1,024.39	372.51	596.01	819.52	1,247.90	1,545.90	1,843.91
Miguel Hidalgo	568.76	617.17	665.57	242.03	387.24	532.46	810.79	1,004.41	1,198.03
Milpa Alta	2,196.37	2,383.30	2,570.22	934.63	1,495.40	2,056.18	3,131.00	3,878.70	4,626.40
Tláhuac	424.69	460.83	496.98	180.72	289.15	397.58	605.41	749.99	894.56
Tlalpan	2,572.35	2,791.28	3,010.20	1,094.62	1,751.39	2,408.16	3,666.97	4,542.66	5,418.36
Venustiano Carranza	450.52	488.86	527.20	191.71	306.74	421.76	642.23	795.60	948.96
Xochimilco	755.52	819.82	884.12	321.50	514.40	707.30	1,077.02	1,334.22	1,591.42
CDMX	15,015.77	16,293.70	17,571.64	6,389.69	10,223.50	14,057.31	21,405.45	26,517.20	31,628.95

Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados identificados en el ACB, la instalación de los SCALL en la CDMX es rentable financieramente, económica y ambientalmente. En este estudio no se incorporaron variables que dieran cuenta de los beneficios sociales que estos dispositivos pueden tener, cuya incorporación podría aumentar aún más su rentabilidad. Los resultados de los indicadores de rentabilidad se detallan en la Tabla 10, y se identifica un VAN entre 17,128 y 64,183 millones de pesos, con una TIR entre 15.3 y 64.2%, y con un periodo de retorno de entre 1.55 y 4.95 años. Cabe mencionar, que las diferencias en los resultados mínimos y máximos del VAN y la TIR se explican por los volúmenes captados mínimos y máximos que fueron considerados en el ACB, los cuales dependen de las superficies que potencialmente pueden ser utilizadas para la cosecha de agua de lluvia, así como por el mantenimiento que los usuarios realizan del dispositivo. En este sentido, es importante tener en cuenta, que este estudio tiene como finalidad poner en evidencia el potencial que tienen la instalación de los SCALL en la CDMX, por lo que en este ejercicio se considera la instalación de estos dispositivos en todas las viviendas de la CDMX, lo cual fue considerado como el volumen mínimo de cosecha de agua de lluvia, y para el caso del volumen máximo colectado se incluyen como superficies de captación las áreas verdes y las vialidades que pueden ser incorporadas a un programa de cosecha de agua de lluvia en la CDMX. Por esta razón, los valores identificados podrían ser considerados demasiado altos. La rentabilidad identificada de la instalación de los SCALL puede ser menor en caso de incorporar en el ACB otros costos o externalidades negativas que no fueron tomadas en cuenta en este ejercicio.

En algunas demarcaciones, cuando la colecta de agua de lluvia es mínima (i.e., cuando la cosecha de agua de lluvia sólo se realiza en las viviendas de la CDMX), este tipo de esfuerzos no son rentables, tal es el caso de Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza. En el caso de Cuauhtémoc, la instalación del dispositivo evaluado de captación y filtración no constituyen un proyecto rentable, aun captando un volumen máximo de agua de lluvia (i.e., cuando la cosecha de agua de lluvia se lleva a cabo en viviendas, áreas verdes y viabilidades). Sin embargo, en el caso de Tláhuac, es la demarcación donde este tipo de iniciativas es más rentable para los diferentes volúmenes potenciales de captación. Otras demarcaciones en donde los proyectos de captación puede ser rentable, si estos colectan más allá del volumen mínimo son Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo, Azcapotzalco, Coyoacán, Álvaro Obregón y Venustiano Carranza. La Tabla 10 detalla los indicadores de rentabilidad de este tipo de iniciativas para la CDMX.

Tabla 10. Análisis de rentabilidad.

Demarcación	Mínimo			Promedio			Máximo		
	VAN	TIR	RI	VAN	TIR	RI	VAN	TIR	RI
Azcapotzalco	277	3.1%	8.49	1,379	53.3%	1.85	2,480	90.0%	1.11
Álvaro Obregón	2,727	46.7%	2.10	3,982	63.7%	1.56	5,238	78.1%	1.28
Benito Juárez	NR	NR	NR	761	22.2%	3.90	1,620	49.8%	1.97
Coyoacán	680	10.3%	6.05	2,582	57.2%	1.73	4,485	93.0%	1.07
Cuajimalpa	2,461	55.4%	1.78	2,848	59.3%	1.67	3,235	62.5%	1.59
Cuauhtémoc	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
Gustavo A. Madero	NR	NR	NR	2656	34.7%	2.74	5,095	64.6%	1.54
Iztacalco	NR	NR	NR	756.9	32.3%	2.91	1,518	63.4%	1.56
Iztapalapa	NR	NR	NR	4,022	38.6%	2.49	7,466	68.7%	1.45
Magdalena Contreras	2,406	47.6%	2.06	6,947	129.4%	0.77	11,489	198.5%	0.50
Miguel Hidalgo	629.2	14.5%	5.11	2,444	69.7%	1.43	4,259	113.2%	0.88
Milpa Alta	1,934	9.0%	6.42	10,742	79.5%	1.25	8,622	58.8%	1.68
Tláhuac	2,238	93.1%	1.07	2,963	113.7%	0.12	3,689	131.3%	0.76
Tlalpan	2,798	14.1%	5.20	6,029	36.5%	2.62	9,261	53.7%	1.84
Venustiano Carranza	NR	NR	NR	1,174	41.1%	2.35	2,172	72.6%	1.37
Xochimilco	1,426	31.2%	2.99	2,423	51.5%	1.91	3,420	19.6%	4.25
CDMX	17,128	15.3%	4.95	40,656	42.9%	2.26	64,183	64.2%	1.55

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

El agua es un recurso vital para el desarrollo económico y para la conservación de los ecosistemas. Sin embargo, en la actualidad enfrenta severos problemas de contaminación y sobreexplotación que afectan el acceso a este recurso, poniendo en riesgo la salud de la población y de los ecosistemas, así como el funcionamiento de las ciudades. Los problemas de acceso al agua son diferenciados en el territorio, por lo que ciertos grupos se ven más afectados por su carencia o su acceso intermitente; estos grupos en general suelen encontrarse en condiciones de marginación con una infraestructura limitada por lo que tienen que destinar un porcentaje más alto de sus recursos para garantizar su acceso. El desigual acceso al agua se espera que se exacerbe el resultado del crecimiento poblacional, del uso más intensivo del agua, de la concentración económica y de los impactos del cambio climático, lo cual obliga a las autoridades a buscar formas alternativas de acceso que les permitan enfrentar este reto. Como una alternativa viable financiera, económica y ambientalmente se encuentra la colecta, tratamiento y reuso del agua de lluvia, la cual puede abastecer una parte importante de la demanda del agua en la CDMX, y constituir una alternativa de acceso al agua relevante para aquellas demarcaciones que se ven afectadas por su falta de acceso, como es el caso de Milpa Alta, Tlalpan, Iztapalapa, Tláhuac y Xochimilco, en particular para los grupos más marginados. Además de los beneficios

económicos que representan los SCALL, por los ahorros en los pagos del servicio de agua, tienen otros co-beneficios importantes que incluyen los ahorros en los costos de operación y mantenimiento, los ahorros por el menor uso de energía en los trasvases y en la extracción de agua del acuífero Valle de México, así como por la reducción en la generación de GEI.

Al considerar no sólo los beneficios económicos directos, sino aquellos que resultan de mejoras ambientales, la instalación de estos sistemas es rentable en la CDMX, con excepción de la demarcación Cuauhtémoc, en donde este tipo de intervención no es rentable, aunque se colecte el volumen máximo posible. Cabe destacar que, en el caso de Benito Juárez, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa y Venustiano Carranza cuando la colecta de agua de lluvia es mínima, este tipo de esfuerzos no son rentables; mientras que Tláhuac es la demarcación donde este tipo de iniciativas resulta más rentable, siendo un sitio estratégico para impulsar de manera más activa un Programa de Cosecha de Agua de Lluvia. Por otro lado, el desarrollo e implementación de la normatividad que regule la captación y el aprovechamiento del agua de lluvia de manera segura para la población es una tarea pendiente por realizar para promover de manera efectiva la instalación de los SCALL no sólo en la CDMX sino en todo el país, garantizando que se cumplan los estándares de calidad para un consumo humano seguro.

Las demarcaciones con el mayor tamaño poblacional son las que presentan mayores ahorros en el pago del servicio de agua, debido a los mayores consumos. Sin embargo, son las demarcaciones que tienen mayores áreas verdes y suelo de conservación en las que se registra la mayor precipitación, y por ende, la mayor colecta de agua de lluvia. En este sentido, incrementar las áreas verdes en aquellas demarcaciones con los menores registros, puede potenciar la colecta de agua de lluvia, además de incrementar la prestación de servicios ecosistémicos como la regulación climática, el secuestro de carbono y la mejora en la calidad del aire. Los beneficios totales (económicos y ambientales) de la colecta de agua de lluvia en la CDMX, potencialmente podría representar ahorros entre \$9,421.05 y \$25,416.75 millones de pesos anualmente; monto que podría ser utilizado para mejorar la infraestructura gris y verde de la ciudad, además de financiar la separación del sistema de drenaje en una red que colecte el agua residual y otra el agua pluvial; estos ahorros por lo menos representarían 60.46% del presupuesto total recibido por SACMEX para el 2020. Cabe destacar, que el periodo de retorno de la inversión por la instalación y el M&O de estos dispositivos se encuentra entre 1.55 y 4.95 años.

El uso de los SCALL no sólo beneficia de manera relevante a la población urbana sino también a la población rural; esta última es la que suele verse más afectada por la falta de acceso a los servicios de agua. A pesar de ello, queda pendiente la atención de problemas relacionados con la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, así como la implementación del modelo de GIRH de manera cabal; ambas problemáticas constituyen retos relevantes a atender y que pueden ser retroalimentados de manera positiva con la cosecha de agua de lluvia, así como

con otras maneras alternativas de acceso al agua como el tratamiento y reuso de las aguas residuales y la desalinización. Evidentemente, la cosecha de agua de lluvia por sí misma no reducirá la vulnerabilidad hídrica de la CDMX, ya que esta medida requiere que se garantice la implementación de acciones orientadas a un uso más eficiente del agua, su conservación y la prevención de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Sin embargo, de lograrse captar el volumen máximo de lluvia, aprovechando todas las superficies potenciales de captación que incluyen los techos de las viviendas de la CDMX, las áreas verdes y las vialidades en donde se puedan implementar estos dispositivos, se podría atender 92.8% de los requerimientos de agua de los capitalinos, lo que requerirá el almacenamiento del agua captada durante la temporada de lluvia, el resto de los meses del año. Por ende, la captación de agua de lluvia en la CDMX constituye una alternativa técnicamente viable que podría contribuir para mejorar la autosuficiencia de la Ciudad, reduciendo tanto la importación de agua desde fuentes distantes como los niveles de sobreexplotación del acuífero. Por lo pronto, la captación del agua de lluvia permite que 0.28% de los capitalinos tenga acceso al agua. Esto pone en evidencia que hasta el momento, las prácticas de gestión del agua en la CDMX, no han aprovechado esta fuente alternativa de agua, la cual podría incrementar la resiliencia de la ciudad para enfrentar los retos que se han planteado a lo largo de este capítulo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México (SECTEI), convenio SECTEI/128/2023, en apoyo del proyecto “Monitoreo de la calidad del agua en los sistemas de captación de agua de lluvia (SCALL) y evaluación del programa de cosecha de agua de lluvia en la Ciudad de México”, con folio 2284c23.

Esta publicación se ha realizado como parte de las actividades programadas en el marco del proyecto LINCGLOBAL VIBRA-IS, financiado en la convocatoria 2022 por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de la Unión Europea, con referencia LNCGL20023.

Referencias

Alatorre Cejudo, L.C., Torres Olave, M.E., Rojas Villalobos, H.L., Bravo Peña, L.C., Wiebe Quintana, L.C., Sandoval Gutierrez, F., López González, E. (2015). *Geoinformática aplicada a procesos geoambientales en el contexto local y regional: teledetección y sistemas de información geográfica*. Ciudad Juárez: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

- Chiu, Y.R., Liaw, C.H., Cheng L.C. (2009). Optimizing rainwater harvesting systems as an innovative approach to saving energy in hilly communities. *Renewable Energy*, 34(2009), 492-498.
- Colorado Guevara, S. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de aprovechamiento de agua de lluvia y de reutilización de aguas grises a nivel vivienda en la Ciudad de Xalapa*, Ver. Jalapa: Universidad Veracruzana.
- CONAGUA (2018). *Tarifas de agua potable y saneamiento para uso doméstico tipo residencial*, 2018. México: SIGA-CONAGUA.
- CONAGUA (2022). *Estadísticas del agua en México*. México: Conagua.
- Congreso de la Ciudad de México (2019). *Presupuesto de egresos 2020 para la Ciudad de México*. Congreso de la Ciudad de México.
- Eroksuz, E., Rahman, A. (2010). Rainwater tanks in multi-unit buildings: A case study for three Australian cities. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1449–1452.
- Farreny, R., Morales-Pinzón, T., Guisasola, A., Taya, C., Rieradevall, J., Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water Research*, 45 (2011), 3245-3254.
- Fernández Pérez, I. (2009). *Aprovechamiento de aguas pluviales*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fuenzalida, M., Buzai, G.D., Moreno Jiménez, A., García de León, A. (2015). *Geografía, geotecnología y análisis espacial: tendencias, métodos y aplicaciones*. Santiago de Chile: Editorial Triángulo.
- INEGI (2022a). *Anuario Estadístico y Geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*. Aguascalientes: INEGI.
- INEGI (2022b). *Estadísticas a propósito del día mundial del agua*. Aguascalientes: INEGI.
- Meter, K.J.V., Basu, N.B., Tate, E., Wyckoff, J. (2014). Monsoon Harvests: The Living Legacies of Rainwater Harvesting Systems in South India. *Environmental Science & Technology*, 48(8), 4217–4225.
- Nolde, E. (2007). Possibilities of rainwater utilisation in densely populated areas including precipitation runoffs from traffic surfaces. *Desalination*, 215(1), 1–11.
- OMS (2018). *Guidelines on sanitation and health*. Ginebra: OMS.
- OMS (2009). Cantidad mínima de agua necesaria para uso doméstico. En: *Guías técnicas sobre saneamiento, agua y salud*. Ginebra: OMS.
- Perló Cohen, M., González Reynoso A.E. (2005). ¿Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México. México: PUEC-UNAM/Fundación Friedrich Ebert.

- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., Pucha Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS*. Quito: Ediloja Cia. Ltda.
- SACMEX (2018). Base de datos del suministro y consume de agua en la CDMX. México: SACMEX.
- Sosa-Rodriguez, F.S. (2010). Impacts of Water Management Decisions on the Survival of a City: From Ancient Tenochtitlan to Modern Mexico City. *Journal of Water Resources Development*. 27 (4), 667-689.
- Sosa-Rodríguez, F.S., Rodríguez Tapia, L., Morales Novelo, J.A. (2018). Cap. 9. Evaluación de la gestión integral de recursos hídricos en la Cuenca del Valle de México. En: Alfonso Rivas Cruces (Coord.). *Estudios y casos por un hábitat sostenible*. México: UAM/Porrúa, 276-305.
- Sosa-Rodríguez, F.S. (2019). Capítulo 3. Factores que determinan la toma de decisiones en la gestión del agua en la Ciudad de México. En: Perló Cohen M. y Zamora Saenz I. (Coords.). *El estudio del agua en México. Nuevas perspectivas teórico-metodológicas*. México: UNAM, 83-116.
- Thacker, N., Bassin, J., Deshpande, V., Devotta, S. (2008). Trends of organochlorine pesticides in drinking water supplies. [*Environmental Monitoring and Assessment*](#), 137 (2008), 295-299.
- UN-Water (2019). *Synthesis Report on Water and Sanitation*. New York: United Nations Publications.
- UNW-DPAC (2011). *El derecho humano al agua y al saneamiento. Guía de lectura Programa de ONU-Agua para la Promoción y la Comunicación en el marco del Decenio*. Washington: UNW-DPAC.
- Worm, J., Van Hattum, T. (2006). *La collecte de l'eau de pluie à usage domestique*. Série Agrodok No. 43. Wageningen: CTA.
- WWAP (2022). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París: UNESCO.
- Zaizen, M., Urakawa, T., Matsumoto, Y., Takai, H. (2000). The collection of rainwater from dome stadiums in Japan. *Urban Water*, 1(4), 355-359.
- Zhang, D., Gersberg, R.M., Ng, W.J., Tan, S.K. (2017). Conventional and decentralized urban stormwater management: A comparison through case studies of Singapore and Berlin, Germany. *Urban Water Journal*, 14(2), 113-124.
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487-505.

Situación Actual del Uso de los Sistemas de Aire Acondicionado en los Edificios. Alternativas Bioclimáticas Sostenibles y Resilientes para Mitigar el Cambio Climático

Dr. José Roberto García Chávez

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco

CyAD. Departamento del Medio Ambiente

Área de Arquitectura Bioclimática. Posgrado en Diseño Bioclimático

Correo electrónico : joserobertogsol@gmail.com

Resumen

Una premisa fundamental en los diversos géneros de edificios es tener condiciones confortables y saludables en el hábitat del hombre. El logro de esta premisa se relaciona con el manejo y la implementación de diversas variables que se interrelacionan en la arquitectura. Una variable que tiene un papel principal es el clima, ya que dicta las reglas del diseño y construcción del hábitat. Actualmente, las temperaturas en el planeta han aumentado progresiva y rápidamente, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XX, y por esta situación, se ha intensificado el Calentamiento Global (CG) en todo el planeta, lo que ha provocado un aumento cada vez mayor para el consumo de energía de los sistemas de climatización artificial de los edificios, principalmente para el Aire Acondicionado (AC), exacerbando los efectos del Cambio Climático (CC). Esta situación es particularmente evidente en los edificios ubicados en la mayoría de los climas durante los períodos de sobrecalentamiento, y no solo durante las condiciones de verano. Una alternativa prometedora para mitigar este problema es la implementación de sistemas bioclimáticos de enfriamiento pasivo en edificios, complementados con programas operativos de eficiencia energética y la implementación de sistemas sostenibles, con base en el uso de energías renovables. Estas alternativas deben tener como objetivo principal proporcionar condiciones de confort ambiental higrotérmico para los ocupantes de los edificios, así como reducir el consumo de energía hacia el logro del objetivo de Edificios de Energía Casi Cero (NZEB) y una efectiva descarbonización. Este trabajo de investigación analiza la situación actual del uso de la energía y su impacto en el medio ambiente y los ecosistemas, así como el uso del AC en los diversos géneros de edificios y plantea diversas alternativas bioclimáticas, sostenibles y resilientes, orientadas a lograr condiciones confortables y saludables en los ocupantes de las edificaciones y a contribuir a mitigar el Cambio Climático en el planeta.

Palabras clave: Arquitectura Bioclimática, Sostenibilidad, Resiliencia, Cambio Climático.

Abstract

A fundamental premise in the different types of buildings is to have comfortable and healthy conditions in the human habitat. The achievement of this premise is related to the management and implementation of various variables that are interrelated in architecture. One variable that plays a major role is the climate, as it dictates the rules of the habitat design and construction. Currently, temperatures on the planet have increased progressively and rapidly, especially since the second half of the 20th century, and because of this situation, Global Warming (GW) has intensified all over the planet, which has led to an ever-increasing growth in the energy consumption of artificial air-conditioning systems in buildings, mainly for Air Conditioning (AC), exacerbating the effects of Climate Change (CC). This situation is particularly evident in buildings located in most climates during periods of overheating, and not only during summer conditions. A promising alternative to alleviate this problem is the implementation of bioclimatic passive cooling systems in buildings, complemented by operational energy efficiency programmes and the implementation of sustainable systems based on the use of renewable energies. These alternatives should have as their main objective to provide hygrothermal environmental comfort conditions for building occupants, as well as to reduce energy consumption towards the achievement of the Nearly Zero Energy Buildings (NZEB) target and an effective decarbonization. This research work analyses the current situation of energy use and its impact on the environment and ecosystems, as well as the use of AC in different types of buildings and proposes various bioclimatic, sustainable and resilient alternatives, aimed at achieving comfortable and healthy conditions for building occupants and contributing to mitigating Climate Change on the planet.

Keywords: Bioclimatic Architecture, Sustainability, Resilience, Climate Change.

Introducción. Uso de la energía en los edificios, impacto en el Medio Ambiente y crecimiento poblacional

El aumento de las temperaturas en el planeta, especialmente durante los periodos de sobrecalentamiento, es una situación, que ha dado lugar a un mayor uso de los sistemas de climatización artificial (Aire Acondicionado) en los edificios y, en consecuencia, afectaciones económicas a los usuarios por el mayor consumo de energía, así como una creciente emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera y aumento del Calentamiento Global y, como resultado, severos daños en el medio ambiente y en sus diversos ecosistemas, provocando múltiples alteraciones en los patrones normales del clima a nivel global, con fenómenos meteorológicos cada vez más frecuentes y de mayor intensidad a nivel global.

Situación del mayor consumo de energía, asociado al Calentamiento Global y su impacto en el Medio Ambiente

Con el advenimiento de la Revolución industrial a mediados del siglo XVIII, cuando se inició la explotación y uso del carbón, se produjeron diversos acontecimientos y cambios en la sociedad y el medio ambiente. A partir de este acontecimiento histórico, se

inició la explotación y quema de los llamados combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), lo que ha provocado un severo impacto en el medio ambiente del planeta y ha detonado los efectos del Calentamiento Global (CG) y el Cambio Climático (CC).

Aunque la variabilidad natural del planeta representa un indiscutible papel, diversos estudios indican que las actividades humanas (acciones antropogénicas), especialmente las emisiones de Gases de Efecto invernadero (GEI) que atrapan el calor, son las principales responsables del calentamiento del planeta y sus consecuencias. En el reciente Sexto Informe de Evaluación (IE6) del IPCC, se resume el estado de los conocimientos sobre el Cambio Climático, sus impactos y riesgos generalizados, y la mitigación y la adaptación al mismo (IPCC, 2023).

Por otra parte, datos recientes en tiempo real indican que el aumento de la temperatura desde 1880 hasta 2023 ha sido evidente y constante (NASA 1, 2023) (Figura 1). Estos datos del ciclo estacional muestran claramente el aumento de las temperaturas a nivel global desde 1880 y que, durante el periodo típico de sobrecalentamiento, que, debido a la distorsión del clima, frecuentemente ocurre antes y se extiende por más tiempo. A veces la duración aproximada en promedio puede ser de más de seis meses, dependiendo de las condiciones geográficas y climáticas de cada lugar. En la Figura 1, la curva del año 2023 hasta septiembre, muestra claramente el incremento de temperaturas, comparado con 2020 (Figura 1).

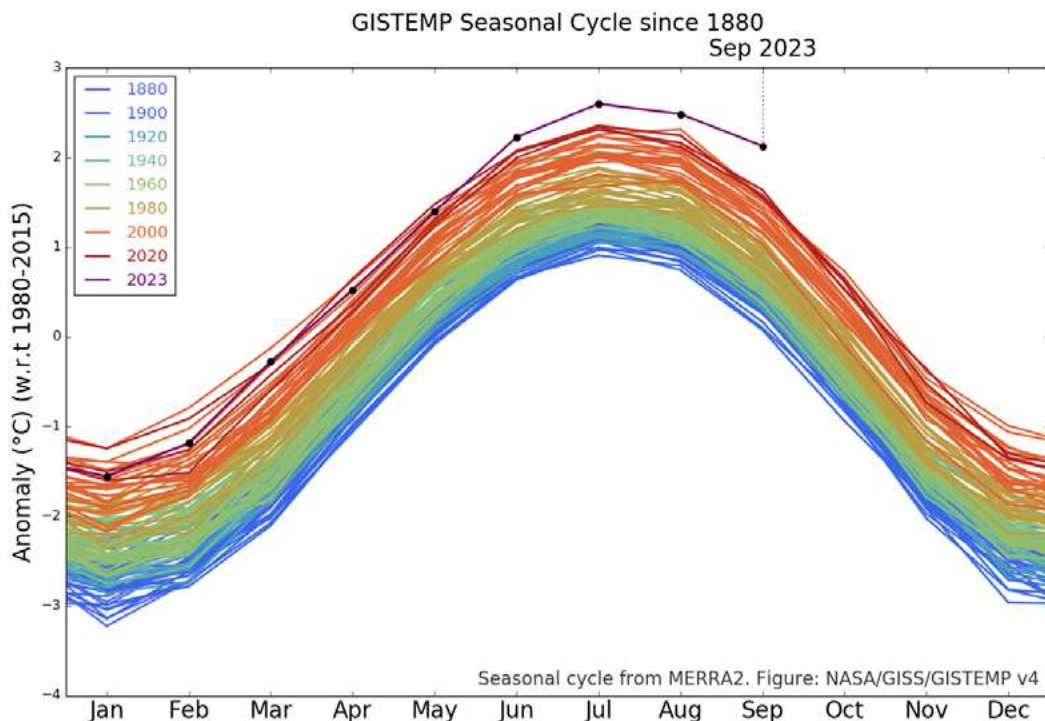


Figura 1. Variación de los ciclos estacionales de temperaturas en el planeta a partir de 1880.

Fuente: (NASA 1. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/)

Recuperado: Septiembre 27, 2023

Asimismo, en la superficie marina también se han registrado incrementos cada vez más evidentes. En la Figura 2 se aprecia cómo ha aumentado la temperatura media de la superficie de los océanos del mundo desde 1880. Este gráfico utiliza la media de 1971 a 2000 como referencia para representar el cambio (NASA 2, 2023). La elección de un periodo de referencia diferente no cambiaría la forma de los datos a lo largo del tiempo. La banda sombreada muestra el margen de incertidumbre de los datos, con base en el número de mediciones recogidas y la precisión de los métodos utilizados.

Los resultados incluyen datos de temperatura de la superficie terrestre y marina en cuerpos de agua que se remontan a 1880, y actualmente incorporan mediciones de 6,300 estaciones meteorológicas de todo el mundo.

La temperatura global en superficie de junio-agosto de 2023 se situó 1.15 °C por encima de la media del siglo XX de 15.6 °C. Esto representa el periodo junio-agosto más cálido de los 174 años de registros, y 0.24 °C de mayor temperatura del récord anterior. Los 10 últimos periodos de junio-agosto son los 10 años más cálidos de los que se tienen registros (NASA 2, 2023).

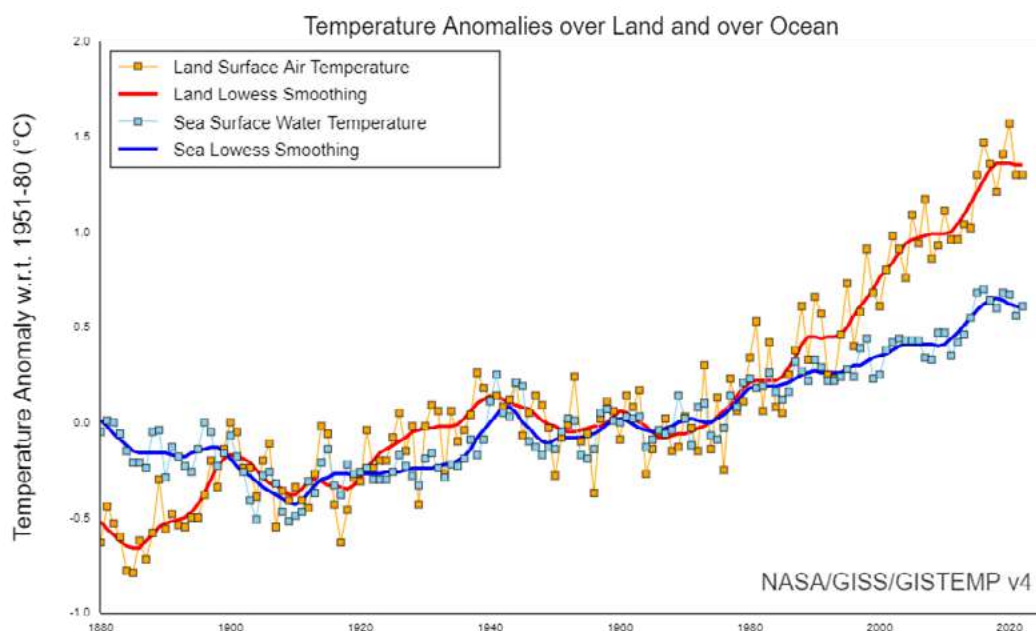


Figura 2. Variación de temperatura media de la superficie terrestre y de los océanos del mundo desde 1880.

Fuente: (NASA 2, 2023. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/)

Recuperado: Septiembre 27, 2023

El periodo junio-agosto se define como el verano meteorológico del hemisferio norte y el invierno meteorológico del hemisferio sur. La temperatura del verano de 2023 en el hemisferio norte fue la más cálida registrada, con 1.44 °C por encima de la media. La temperatura invernal del hemisferio sur en el mismo período también fue la más cálida registrada, con 0.85 °C por encima de la media.

Estos valores evidencian el incremento de temperaturas, tanto en la superficie terrestre como en los océanos y en los cuerpos de agua de diversos ecosistemas, y esta situación está provocando severas afectaciones que se relacionan con otros ecosistemas a nivel de litósfera y atmósfera.

Ciertamente, los efectos del calentamiento de la superficie terrestre y de los océanos incluyen el aumento del nivel del mar debido a la expansión térmica, así como la decoloración de los corales, el deshielo acelerado de las principales capas de hielo de la Tierra, la intensificación de los huracanes y otros fenómenos meteorológicos que repercuten en la salud y la bioquímica de los océanos y sus diversos ecosistemas y que también se correlacionan con diversas afectaciones en los ecosistemas del planeta, incluyendo a los seres humanos. A medida que el calor y la energía excesivos calientan los océanos, el cambio de temperatura provoca efectos en cascada sin precedentes, como el deshielo, la subida del nivel del mar, las olas de calor marinas y la acidificación de los océanos, entre otros fenómenos.

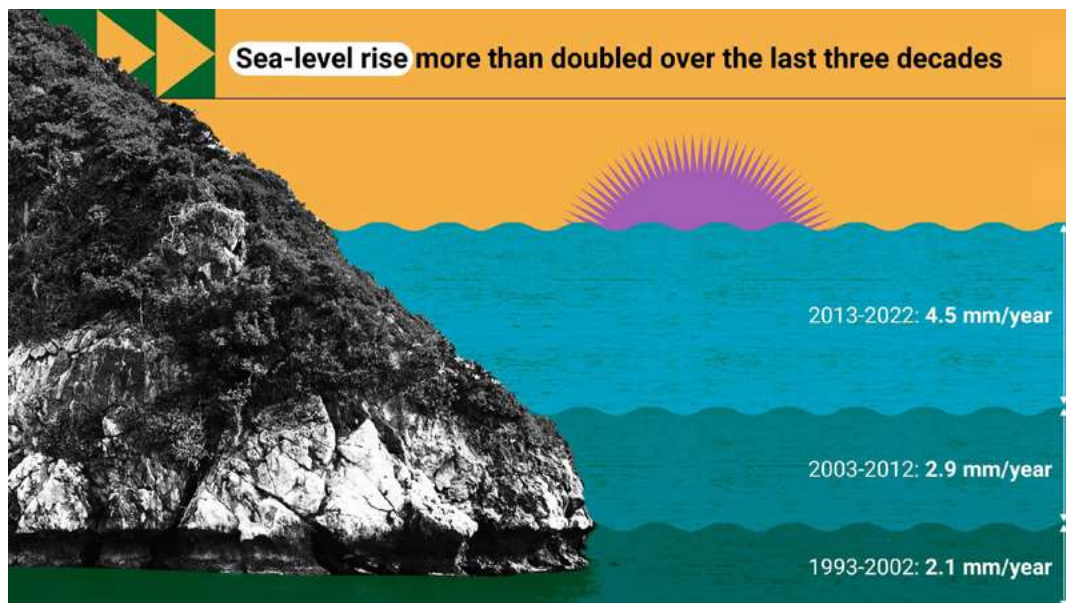


Figura 3. Incremento del nivel del mar en las tres últimas décadas.

Fuente: (<https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/ocean-impacts>)

Recuperado: Octubre 30, 2023

En eventos meteorológicos recientes a nivel mundial, se han evidenciado los efectos del aumento de la temperatura en los océanos, que se ha incrementado más de 300% en las tres últimas décadas, más que en la superficie terrestre, debido principalmente a acciones antropogénicas (Figura 3). Los océanos actúan como sumideros de carbón, ya que absorben el calor y energía liberados por el continuo incremento de las emisiones de GEI atrapados en el sistema terrestre y potencian los efectos de los huracanes que a su vez se intensifican en muy corto tiempo. En la actualidad, los océanos del planeta han absorbido cerca del 90% del calor generado por el aumento de las emisiones de los GEI (UN 1, 2023).

Las olas de calor marinas han duplicado su frecuencia y se han hecho más duraderas, intensas y extensas. El IPCC afirma que la influencia humana ha sido el principal motor del aumento del calor oceánico observado desde la década de 1970 (IPCC, 2023).

Estos cambios causan un impacto persistente en la biodiversidad marina y en las vidas y medios de subsistencia de las comunidades costeras y más allá - incluyendo alrededor de 680 millones de personas que viven en zonas costeras bajas, casi 2,000 millones que viven en la mitad de las megaciudades del mundo que son costeras, cerca de la mitad de la población mundial (3,300 millones), que depende de los productos marinos para obtener proteínas, y cerca de 60 millones de personas que trabajan en la pesca y el sector de la acuicultura en todo el mundo (UN, 2023).

Crecimiento poblacional

El crecimiento poblacional a nivel mundial está correlacionado con diversas afectaciones en el medio ambiente, que se han exacerbado, tanto a nivel urbano como a nivel rural. Hace aproximadamente 10,000 años, en los albores de la agricultura, hacia el año 8,000 a.C., la población mundial era de alrededor de 5 millones de habitantes. A lo largo de los 8,000 años hasta el año 1 d.C., la población mundial creció hasta alcanzar cerca de 200 millones, con una tasa de crecimiento inferior al 0.05% anual. En la actualidad, desde el 15 de noviembre de 2022, la población a nivel mundial ha rebasado los 8,000 millones de habitantes y continúa creciendo a una tasa anual de 0.84 %. (WP, 2023) (Figura 4.). Sin embargo, las proyecciones indican un decrecimiento de la población a partir de los siguientes años (UN 2 Population Division, 2023) (Figura 5).

A mediados del siglo XVIII, a partir del surgimiento de la Revolución industrial, se produjo una enorme transformación en las diversas sociedades, y en particular con el inicio de la explotación del carbón (el primero y uno de los tres combustibles fósiles junto con el petróleo y el gas natural). Mientras la población mundial había tardado toda la historia de la humanidad hasta alrededor de 1800 en alcanzar los mil millones, los segundos mil millones se lograron en sólo 130 años (1930), los terceros mil millones en 30 años (1960), los cuartos mil millones en 15 años (1974) y los quintos mil millones en sólo 13 años (1987). Tan sólo durante el reciente y el anterior siglo XX, la población mundial pasó de 1,650 millones a 6,000 millones (UN 3, 2023).

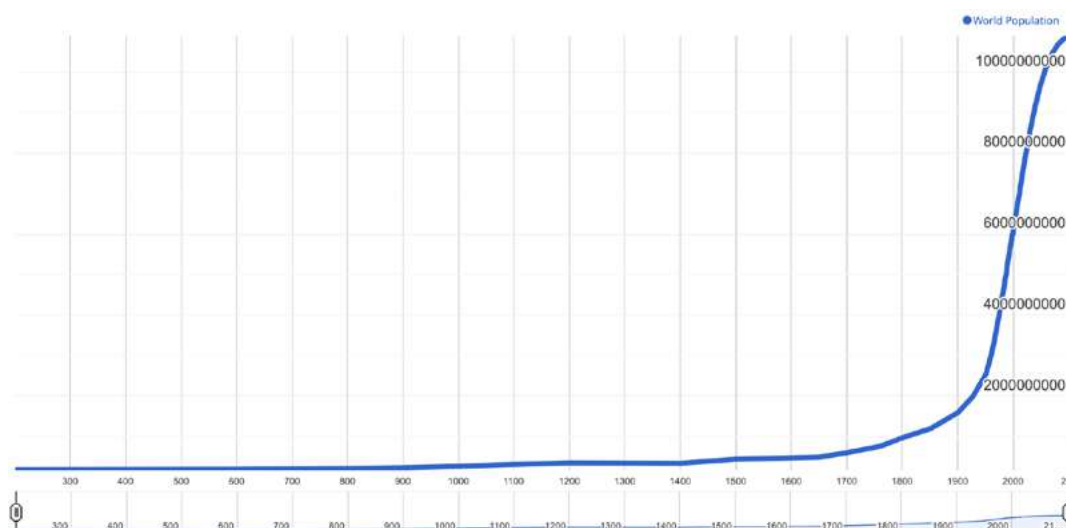


Figura 4. Crecimiento poblacional mundial

Fuente: https://www.worldometers.info/world-population/#google_vignette
 Recuperado en octubre 30, 2023

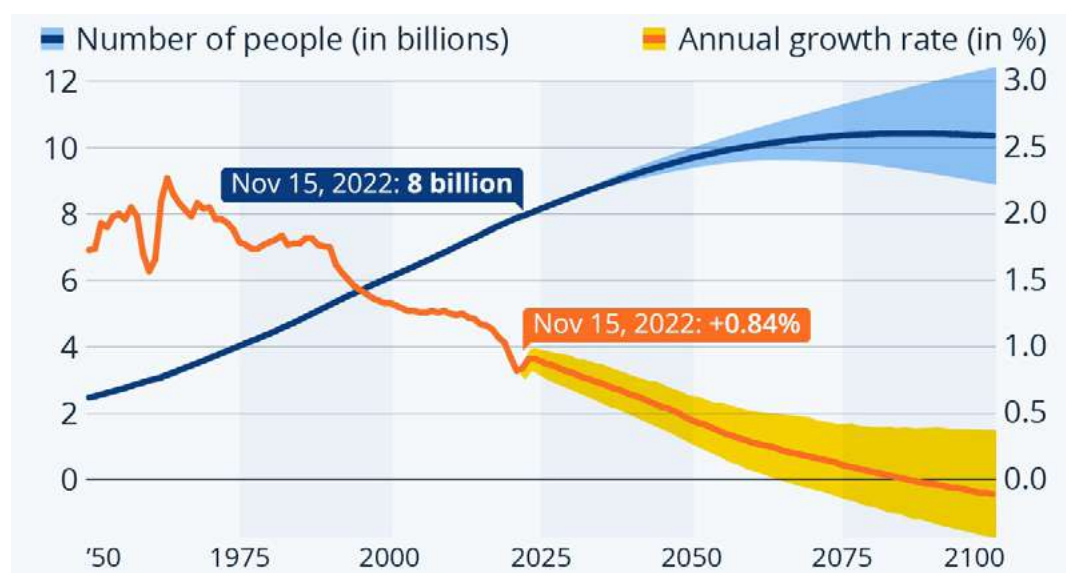


Figura 5. Predicciones del crecimiento poblacional a partir de 2022, de acuerdo a un escenario medio con fertilidad moderada.

Fuente: UN Population Division (<https://www.un.org/development/desa/pd/>)
 Recuperado en septiembre 27, 2023

Por otra parte, la población urbana ha aumentado considerablemente a partir de mediados del siglo XX. Ciertamente, una corriente constante de migración humana desde las zonas rurales con altos niveles de marginación, hacia los crecientes centros metropolitanos, desigualmente distribuidos por regiones, ha sacudido la dinámica del po-

der mundial y ha provocado una serie de negativas consecuencias medioambientales, sociales y económicas. Es importante mencionar que, en 2009, la población urbana mundial superó a las personas que vivían en zonas rurales (UN, 2023) (Figura 6).

En la actualidad, el 55% de la población mundial vive en zonas urbanas, una proporción que se espera aumente hasta el 68% en el año 2050. Las proyecciones muestran que la urbanización, el desplazamiento gradual de la residencia de la población humana de las zonas rurales a las urbanas, combinada con el crecimiento global de la población mundial, podría añadir otros 2,500 millones de personas a las zonas urbanas de aquí a 2050, y cerca del 90% de este aumento tendría lugar en Asia y África (UN, 2023).

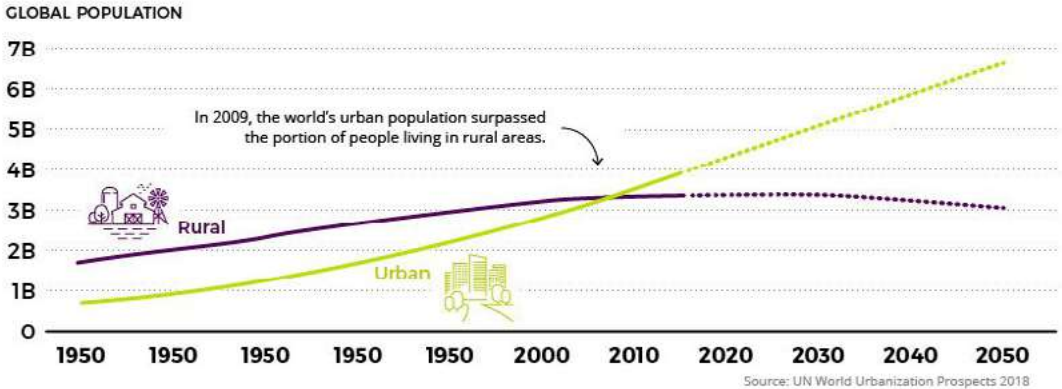


Figura 6. Población Mundial. Población urbana y rural.

Fuente: World Urbanization Prospects, 2018. <https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900>

Recuperado en septiembre 21, 2023

Situación Actual del Uso de Sistemas de Climatización en los Edificios y su Relación con el Calentamiento Global

Las emisiones mundiales de CO2 relacionadas con la energía crecieron 0.9% o 321 Mt en 2022, alcanzando un nuevo máximo de más de 36.8 Gigatoneladas. Tras dos años de oscilaciones excepcionales en el uso de la energía y las emisiones, causadas en parte por la pandemia de Covid-19, el crecimiento del año pasado fue mucho más lento que el repunte de 2021, de más del 6% (IEA WEO, 2023).

Por otra parte, el incremento de las temperaturas en todo el planeta está provocando que se intensifique el uso de los sistemas de Aire Acondicionado (AC); en las edificaciones y, como resultado, se presentan efectos económicos negativos y un mayor consumo de energía, lo que induce a una emisión cada vez mayor de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera, afectando considerablemente al medio ambiente y sus diversos ecosistemas.

Los edificios, con sus persistentes y elevados consumos de energía, son responsables en gran medida del Cambio Climático, ya que representan un tercio del consumo mundial de energía y una cuarta parte de las emisiones de CO2 (WEO, 2023) (Figura 7). De todos los géneros de edificios, los edificios residenciales son los que más energía consumen. Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) concentran el 38% del consumo de energía y en consecuencia, el uso de la electricidad está aumentando rápidamente, lo que a su vez representa una herramienta potencial para contribuir a la mitigación del Cambio Climático, siempre y cuando se realice con base en la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, así como con la complementación de energías renovables y tecnologías sostenibles.

El creciente impacto del Calentamiento Global hace que este escenario sea aún más significativo, ya que cada vez son más las infraestructuras energéticas en los edificios que se construyeron desde hace varias décadas para un clima menos cálido que el actual, y que ya no son apropiadas para las condiciones presentes, agravadas con la presencia de fenómenos meteorológicos, que cada vez son más frecuentes y extremos por la distorsión constante del clima.

En resumen, es indispensable transformar el sistema energético actual para evitar un Cambio Climático aún más severo, con las negativas consecuencias, cada vez más notorias a nivel global, y que en muchos casos ya son irreversibles.

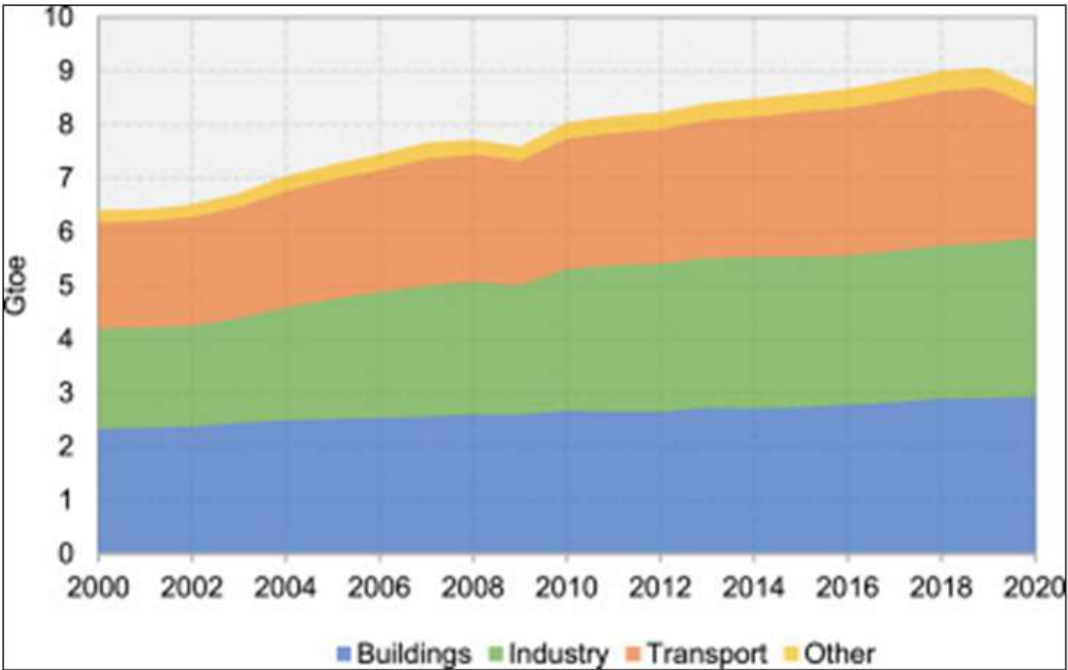


Figura 7. Consumo Mundial de Energía por Sectores

Fuente: IEA, 2021e, IEA, 2021d, IEA, 2021b

Recuperado en septiembre 27, 2023

Por lo que respecta a la emisión de CO₂, directa e indirecta por sectores, esta es la información reportada, de acuerdo con datos recientes (IEA, 2021b). Tabla 1.

Tabla 1. Emisiones Directas e Indirectas de CO₂ en 2019

SECTOR	Directo	Indirecto	Total
Industrial	19%	19%	38%
Edificios	9%	19%	28%
Transportación	25%	3%	28%
Otros	2%	4%	6%

Fuente: <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
Recuperada en septiembre 27, 2023

Ciertamente, el aumento del Calentamiento Global y la intensificación del Cambio Climático a nivel global están directamente relacionados con la progresión exponencial en el uso de sistemas de aire acondicionado en edificios y persiste un rápido aumento, sobre todo en las zonas urbanas. Además, la cantidad de energía utilizada es de cerca del 80% del total a nivel global, y aún proviene de la quema y emisión de los altamente contaminantes combustibles fósiles (IEA, 2023).

Como cada vez hace más calor, se utilizan más los sistemas de aire acondicionado con lo cual aumenta gradualmente el CG en el planeta y se provoca un grave daño al medio ambiente y sus ecosistemas y en la salud de las personas (Figura 8).

Actualmente, el uso de sistemas de aire acondicionado, representa casi el 20% del total de la electricidad utilizada en edificios en todo el mundo y el 10% del consumo de toda la electricidad (IEA, 2023). Esta tendencia aumentará debido a factores como los económicos y crecimiento demográfico, y se observará con mayor evidencia en regiones cálidas, así como en climas templados durante los períodos de sobrecalentamiento (Figura 9). Por lo tanto, el uso de AC en los edificios aumentará enormemente, convirtiéndose en uno de los principales factores de la demanda mundial de electricidad y la resultante alta emisión de contaminantes en forma de gases de efecto invernadero a la atmósfera, y al eventual, y cada vez mayor deterioro del clima.

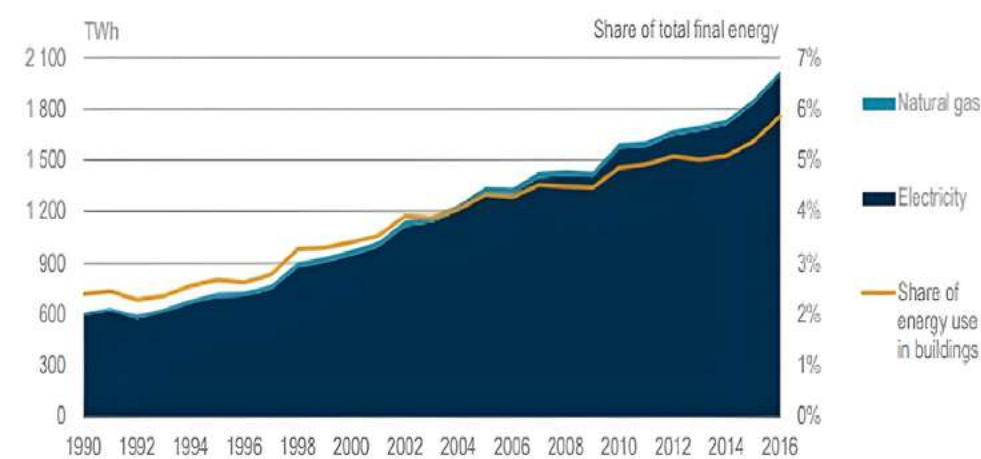
El consumo total de electricidad para AC en todo el mundo, aumentó a 2,000 TWh en 2016, lo que representó casi el 10% de los 21,000 TWh de electricidad consumida en todo el mundo en todos los sectores. Este consumo de electricidad no ha dejado de crecer en el último medio siglo, hasta alcanzar aproximadamente 25,500 TWh en 2022 (Enerdata Statista, 2023) (Figura 10). Entre 1980 y 2022, el consumo de electricidad se triplicó. El crecimiento poblacional y la explosiva industrialización y urbanización, así como el acceso a la electricidad en todo el mundo, han impulsado aún más su creciente y acelerada demanda.

Actualmente hay en funcionamiento aproximadamente 2,000 millones de equipos de AC, por lo tanto, el enfriamiento de los espacios arquitectónicos es uno de los principales factores del aumento de la demanda de electricidad en los edificios y de la ampliación de la capacidad en las plantas de generación para satisfacer los picos de demanda. Por lo que respecta a los equipos de AC en edificios habitacionales, éstos representan casi el 70% del total (IEA, 2023). El consumo de energía para el enfriamiento de espacios se ha más que triplicado desde 1990, con importantes implicaciones para las redes eléctricas, las emisiones de GEI y las islas de calor urbanas, entre otras.

En los años recientes, cada vez son más frecuentes episodios de ondas de calor extremo y temperaturas récord a nivel global. Por ejemplo, 2022 fue el cuarto año más cálido registrado desde finales del siglo XIX (IEA, 2023). La falta de acceso a la climatización artificial en interiores pone a gran parte de la población mundial de bajos recursos, en alto riesgo de afectarse por estrés térmico, por falta de condiciones favorables de confort térmico, así como afectaciones en su productividad laboral y, sobre todo, en su salud.

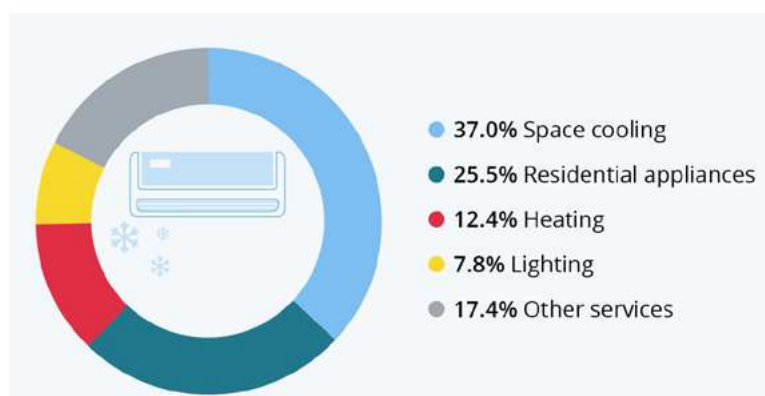
Figura 8. Consumo mundial de energía para el enfriamiento de los edificios.

Fuente: (IEA, 2018). http://www.iea.org/publications/free_publications/publication/The_Future_of_Cooling



Recuperado en septiembre 29, 2023

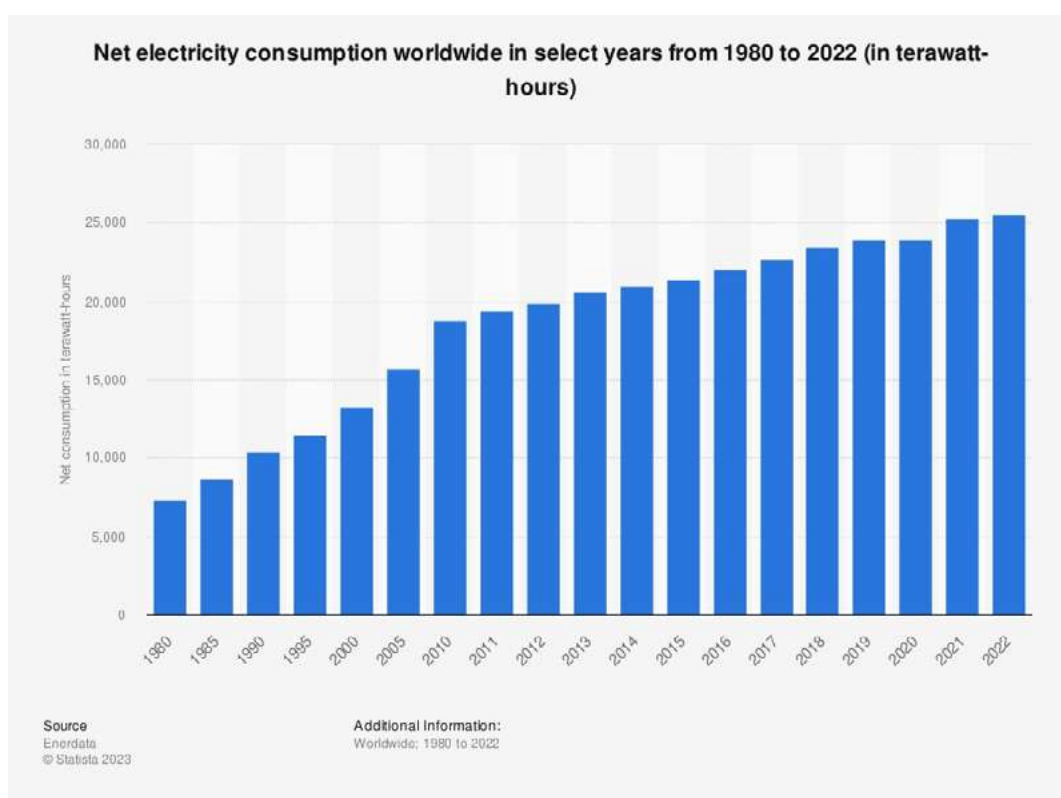
Figura 9. Porcentaje de uso de AC, el mayor factor en la demanda creciente de electricidad. Consumo de electricidad en los edificios por servicios. Crecimiento de la demanda global de electricidad de 2018 a 2050 por categoría de uso de energía.



Fuente: (IEA, 2023 Statista. <https://www.statista.com/statistics/280704/world-power-consumption/>)
Recuperado en septiembre 29, 2023

Figura 10. Consumo mundial de energía eléctrica de 1980 a 2022 (TeraWatts-Hora).

Fuente: (Enerdata Statista, 2023. <https://www.statista.com/statistics/280704/world-power-consumption/>)



Recuperado en septiembre 29, 2023

Si actualmente la Tierra ya está 1.1 °C más caliente que a finales del siglo XIX, y las emisiones siguen aumentando, es imperativo que el calentamiento global no supere los 1.5 °C, como se planteó en el Acuerdo de París de la COP 21 en 2015, para que las emisiones de GEI se reduzcan en un 45% para 2030 y llegar a cero en 2050.

Estas medidas deben complementarse con un mejoramiento de la eficiencia energética de los equipos de AC, y ajustar sus rangos de operación, para “enfriamiento” de entre 24 °C y 26 °C, dependiendo de las condiciones del clima de cada lugar, aplicando un “factor de aclimatización” para los ocupantes, cuando esto sea factible. Para “calefacción”, el rango debe considerarse de entre 18 °C y 20 °C, también dependiendo de las condiciones del clima del lugar y de los niveles de aclimatización de los ocupantes.

En consecuencia, es necesario aplicar acciones para resolver el problema provocado por el intenso y creciente uso de los sistemas de AC en los edificios, y una de las más importantes es mejorar su eficiencia energética con el fin de reducir la necesidad de construir nuevas centrales eléctricas de generación, utilizar sistemas sostenibles con base en la implementación de energías renovables, así como reducir emisiones de los GEI y mitigar los efectos del Cambio Climático a escala mundial. Este enfoque puede contribuir de forma sostenible a conseguir beneficios económicos y condiciones de confort ambiental interior para los ocupantes de los edificios y, lo que es más importante, puede coadyuvar a mejorar su calidad de vida y su salud.

Alternativas Bioclimáticas Sostenibles y Resilientes para mitigar el Cambio Climático

A medida que el planeta se calienta cada vez más, es primordial garantizar que las necesidades de climatización de los espacios arquitectónicos se satisfagan de forma equitativa y sostenible y que la meta de lograr “Emisiones Netas Cero para 2050” (NZEB), tenga como premisa para 2030 los siguientes objetivos: Que los nuevos edificios sean 100% de “cero carbono” y los existentes lo sean en al menos un 20%, con la implementación de efectivas estrategias bioclimáticas y tecnologías sostenibles y resilientes (EU, 2021).

Un edificio de energía neta cero (NZEB) es aquel cuya eficiencia es óptima y que, a lo largo del tiempo de su operación, genera energía *in situ* o cercana, utilizando recursos energéticos renovables limpios, en una cantidad igual o superior a la cantidad total de energía consumida *in situ*.

Para lograr estos objetivos, se debe priorizar en la implementación de “Sistemas Pasivos Bioclimáticos”, donde juega un papel muy importante la “envolvente de los diversos géneros de edificios” (Figura 11), tanto para el enfriamiento como para el calentamiento de edificios, así como para la ventilación natural, humidificación y des-humidificación, entre otros requerimientos y servicios.

Asimismo, es necesario ajustar el rango de los equipos de AC entre 24°C y 25°C. También se debe mejorar la eficiencia de los equipos con tecnologías sostenibles de vanguardia. Estos conceptos se ejemplifican en el “Triángulo de Energía” (Figura 11).

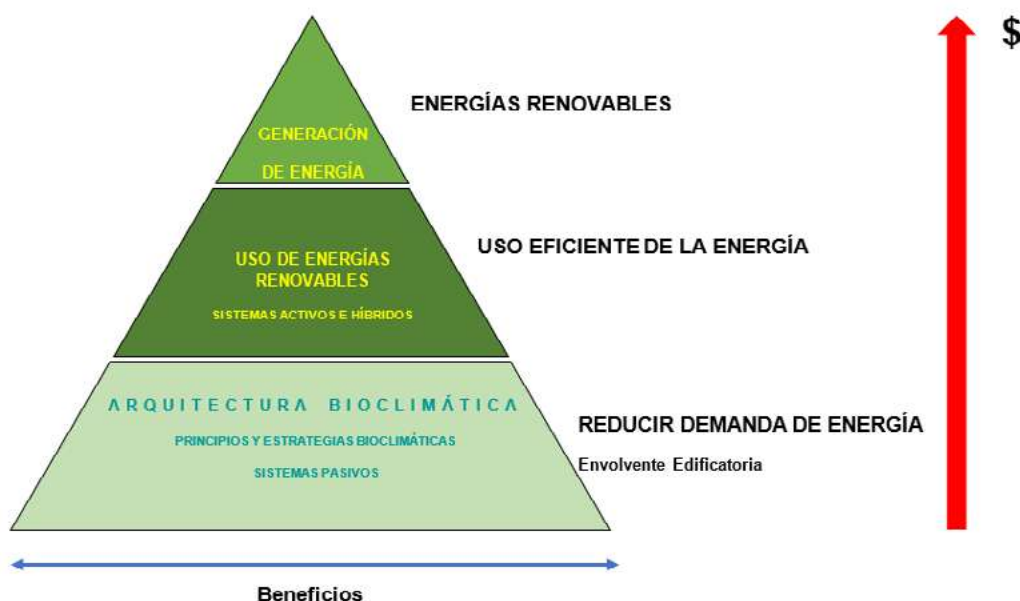


Figura 11. Triángulo de energía

Fuente: Elaboración propia, con base en Lechner, 2014. <http://sustain.auburn.edu/sustainability-in-action-norbert-lechner/> Recuperado en septiembre 27, 2023

Conclusiones

Los diversos géneros de edificios en los que las personas realizan sus actividades son responsables de aproximadamente el 40% del total mundial de emisiones directas e indirectas de Gases de Efecto Invernadero. El entorno construido es, por tanto, uno de los principales motores responsables del Cambio Climático. Al mismo tiempo, modificar cómo y qué construimos es una de las herramientas más eficaces para mitigar el deterioro del medio ambiente y lograr una apropiada adaptación a él, e implica una gran responsabilidad para el sector de la construcción en todos niveles.

En resumen, el aumento de las necesidades de refrigeración artificial en los edificios generará una masiva demanda de energía eléctrica, que en su mayoría proviene de combustibles fósiles, lo que a su vez provocará más contaminación y emisión de CO₂, responsable de más del 70% del volumen de GEI en la atmósfera y más efectos debidos a la intensificación del CC y el consiguiente deterioro del medio ambiente, los ecosistemas y severas afectaciones en la salud de las personas.

La demanda de energía para los requerimientos de enfriamiento y calefacción en los edificios, que representa la mayor parte del consumo energético en los diversos géneros de edificios en el sector de la construcción, se ha confirmado como el principal factor que muestra claramente el impacto del Cambio Climático y sus adversas consecuencias en la calidad de vida y la salud de las personas.

Por lo tanto, cuanto más se usen los sistemas de climatización artificial, más altas serán las temperaturas en el ambiente y mayor la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera; y al presentarse más calor, se necesitará una mayor operación de los equipos de AC, de tal manera que se provoca un “círculo vicioso”. Debido a que, a mayor uso de los sistemas de AC, más consumo de energía y más altas temperaturas en el ambiente.

Asimismo, es primordial garantizar que las necesidades de climatización de los edificios se satisfagan, en la medida de lo posible, con la implementación de sistemas pasivos de diseño bioclimático, de manera equitativa y sostenible y con estas premisas, contribuir a generar “un círculo virtuoso”.

Con la aplicación efectiva de estas acciones, se puede contribuir a mitigar el Cambio Climático, así como a mejorar el medio ambiente, la economía, la calidad de vida y la salud de las presentes y futuras generaciones a nivel global.

Referencias

BP Outlook (2023). Review of World Energy

<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>

IEA (2018). The Future of Cooling 2018.

https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/The_Future_of_Cooling.pdf.

IEA, World Energy Outlook, 2023. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>

IEA (2021b). IEA, 2021e, IEA, 2021d, IEA, 2021b

IEA, (2023). Energy Systems. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/space-cooling>

IPCC, (2023). 6th Synthesis Report. March, 2023. <https://www.ipcc.ch/ar6-syr/>

NASA 1, (2023). GISS Surface Temperature Analysis (v4). GISTEMP Seasonal Cycle since 1880. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

NASA 2, (2023). GISS Surface Temperature Analysis (v4). GISTEMP Seasonal Cycle since 1880. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/

WP (2023). World Population, 2023.

<https://www.worldometers.info/world-population/#google%20vignette>

UN 1, (2023). <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/ocean-impacts>.

Enerdata Statista, (2023). <https://www.statista.com/statistics/280704/world-power-consumption/>

UN 2, (2023). Population Prospects. <https://www.statista.com/chart/28744/world-population-growth-timeline-and-forecast/>.

UN 3, (2023). <https://www.un.org/en/climatechange/science/climate-issues/ocean-impacts>

UN Population Division. <https://www.un.org/development/desa/pd/>

EU Directive. Near Zero-Energy Buildings. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en

Capítulo 10

La Cal como Material para la Construcción de una Sociedad más Comprometida con el Cuidado del Medio Ambiente

Maria del Rosario Tovar Alcázar

Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.
División de Ciencias y Artes para el Diseño. Posgrado en
Diseño Bioclimático

Correo electrónico: rosariotovaralcazar@hotmail.com

Resumen

La cal es un material de origen natural que a lo largo del tiempo ha sido utilizado tanto en la industria de la transformación como en la construcción y en múltiples tareas cotidianas.

Aunque su arraigo en algunas comunidades pareciera que obedece a un bajo presupuesto para la compra de otros materiales de mayor complejidad, la realidad es que usar cal tiene una connotación social con un profundo sentido de identidad, en la que la réplica de técnicas heredadas de generación en generación, es un patrón digno de reconocer y preservar.

Los vestigios del uso de cal en diferentes épocas y latitudes, han permitido identificar las formas en las que ésta ha simplificado los procesos en diversos sectores; contribuyendo al bienestar social, pero sobre todo, al cuidado del ambiente, por ser un material con gran versatilidad, que lo mismo puede remediar suelos contaminados, que captar dióxido de carbono de la atmósfera a través de las superficies que recubre.

El presente estudio considera una de las facetas más interesantes de la cal, misma que hace referencia al conocimiento y selección de materiales por parte de la sociedad, para el establecimiento de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático -especialmente- en zonas de alta vulnerabilidad geográfica como México.

Palabras clave: cal, construcción, bienestar, ambiente.

Abstract

Hydrated lime is a material of natural origin that over time, has been used both in the transformation industry, in construction and in multiple daily tasks.

Although its roots in some communities seem to be due to a low budget for the purchase of other materials of greater complexity, the reality is that using hydrated lime has a social connotation with a deep sense of identity, in which the replication of techniques inherited from generation to generation is a pattern worthy of recognizing and preserving.

The vestiges of the use of hydrated lime in different times and latitudes have made it possible to identify the ways in which it has simplified processes in various sectors; contributing to social wellness, but above all, to the care of the environment, as it is a material with great versatility, which can remedy contaminated soils, as well as capture carbon dioxide from the atmosphere through the surfaces it covers.

This study considers one of the most interesting facets of lime, which refers to the knowledge and selection of materials by society, for the establishment of mitigation and adaptation measures to climate change, especially in areas of high geographical vulnerability such as Mexico.

Keywords: Hydrated lime, construction, wellbeing, environment.

El origen de la cal

“Al parecer, la cal viva (óxido de calcio) fue descubierta casualmente por el hombre primitivo cuando realizaba fogatas sobre rocas calcáreas, las que luego apagaba con agua, llegando a notar que en operaciones sucesivas, las rocas iban sufriendo cambios físicos hasta desintegrarse, (transformación a cal apagada). Luego se dio cuenta que la roca se transformaba en una pasta, que se dejaba moldear y con el tiempo se secaba adquiriendo dureza (transformación a carbonato) lo que seguramente le permitió pegar piedras y fabricar sus medios de protección al ambiente, como pircas¹, chozas² y otros” (Coloma, 2008, p.29).

En México, se ha sabido aprovechar el potencial de uno de los recursos más abundantes en el planeta, el carbonato de calcio³ (Fig. 1); roca que da origen a la cal y como nota curiosa, es uno de los componentes minerales de mayor relevancia en los huesos, de ahí la gran resistencia de éstos.



Figura 1. Yacimiento de roca caliza y planta de producción de cal en México. 1930.

-
1. Paredes de piedra.
 2. Refugios contruidos con palos y paja.
 3. Roca caliza.

“A principios del siglo XX, se constituyó una de las primeras empresas que forjarían la historia moderna de la industria de la cal en México, la entonces llamada Compañía Calera de Apasco, fundada por el ingeniero Luis Espinosa, que con el tiempo se convertiría en Grupo Calidra” Calidra, 2009, p. 12).

La cal hidratada surge de la calcinación del carbonato citado y la posterior hidratación de la cal viva resultante.

Este proceso ha sido simplificado al paso de los años, anteriormente la cal tenía que ser “apagada” *in situ*; es decir, en amplios contenedores que permitían “ahogarla” para de ahí, obtener una pasta añeja de fácil manipulación manual (Fig. 2).



Figura 2. Apagado de cal en artesas tradicionales. **Fuente:** Elaboración propia.

Sin embargo, los avances en la industria poco a poco, fueron permitiendo que los pasos para su obtención, se modificaran, al grado de que hoy por hoy, este material es un polvo que puede envasarse en sacos de papel Kraft y manejarse con relativa rapidez (Fig. 3).

Esta presentación ensacada brindó a la cal, la posibilidad de vincularse a diversos sectores como el alimenticio, farmacéutico, minero, químico, agropecuario, además del de la construcción y cuidado de ambiente, que son de los más beneficiados por la amplia gama de aplicaciones que existen para este material.

“Cuando nos percatamos de que la cal está presente en nuestra vida cotidiana; porque es parte de los procesos tanto alimenticios como químicos, cosmetológicos y farmacéuticos, es que comenzamos a valorar lo que siempre hemos tenido a nuestro alcance.

La cal es un material que por su versatilidad podría reducir de manera considerable la marginación y falta de sanidad de muchas comunidades -consideradas como- vulnerables” (To-var. 2022, p. 39).



Figura 3. Cal hidratada envasada en saco de papel. **Fuente:** Elaboración propia.

La cal y sus usos

“La cal es un material que formaba literalmente, parte de la vida de las personas desde su inicio, hasta el mismo día de su muerte” (Usedo, 2015, p.3).

Entre las aplicaciones que la cal tiene están las que la categorizan como: estabilizador, floculante, neutralizante, adhesivo, relleno, aglutinante, reactivo, pintura, abono, desinfectante, recubrimiento, aditivo e impermeabilizante.

Es esta pluralidad, la que hace de la cal un insumo que -al menos- en México, ha marcado la pauta para el desarrollo de muchas actividades económicas y la obtención de grandes beneficios socio-ambientales.

“Se hace notar que en México los habitantes de la época precolombina ya utilizaban el óxido de calcio en la nixtamalización del maíz – maíz hervido en agua, que después de ablandarse se muele para obtener masa, la cual, sirve para elaborar tortillas- y el agua alcalina sobrante llamada <Nejayote>, se utilizaba y se usa todavía como remedio para tratar a los

animales caseros contra la sarna y lavar las heridas de los perros, cerdos mordidos por animales rabiosos y así, evitar este mal” (Larrea et al.,1995, p.6).

La nixtamalización, es -sin duda- uno de los procesos de mayor impacto en la alimentación, porque gracias a ésta, es que se pueden asimilar los nutrientes del maíz y evitar algunos malestares estomacales por su ingesta. También, funge como conservante de las tortillas y es una fuente de calcio que ayuda al fortalecimiento de dientes y huesos.

“Uno de los usos más antiguos de la cal viva fue en la agricultura, como abono de cal, donde la adición de ésta a los suelos precede la era cristiana. Producciones de diversas cosechas pueden ser significativamente aumentadas por el abono de cal. [...] Solamente en tiempos recientes se ha llegado a conocer que la función del abonado de cal, es para neutralizar la acidez del suelo y suministrar el nutriente calcio, magnesio y otros elementos trazas⁴ que son esenciales para el desarrollo de los vegetales.” Coloma, 2008, p. 30).

También, el uso de cal en los cultivos y huertos es una práctica ampliamente recomendada, porque es una fuente de calcio insustituible, es de alta eficiencia y bajo costo. Se debe recordar que las especies vegetales requieren del calcio para el desarrollo de las hojas y raíces; además, de que éste favorece la absorción de los demás micronutrientes.

La trascendencia de su uso en el país, obedece a su peculiar forma de reaccionar y crear ambientes alcalinos. Toda vez, que la cal es un reactivo natural que eleva el pH; siendo esta condición, de gran ayuda para mitigar la proliferación de agentes tóxicos o contagiosos e inhibir el desarrollo de microbios y bacterias.

“[...] es importante decir que la cal, cumple cabalmente con muchas de las propiedades requeridas por la normatividad concerniente o aplicable a productos aptos para el consumo humano. No es casualidad que la cal intervenga en prácticas ancestrales [...]. Incluso, es normal pensar en la cal cuando de contrarrestar la acidez se trata. Tanto la estomacal, como la relativa al suelo y al agua, porque ¡la cal alcaliniza!

La cal es adaptable y se complementa con diversos elementos naturales, ésta es una de las razones por las que -cada vez- tiene más opciones de aplicación” (Tovar, 2022, p.1).

De hecho, es esta característica la que ha reforzado su participación dentro de la industria agropecuaria y química, por mencionar las más significativas para el bienestar socio-ambiental.

“Tal vez, su mayor hazaña sea, que eleva a 12.4 el pH del agua o la materia, condición que se conoce como el efecto biocida, mismo que es considerado como la posibilidad de destruir, inhibir o neutralizar los microbios, parásitos, bacterias y demás agentes nocivos o perjudiciales para los seres vivos. Se dice, que esta acción antiséptica⁵ de la cal está vinculada

4 . Son aquellos necesarios para el buen funcionamiento de los organismos, pero en cantidades ínfimas.

5. Sustancia antimicrobiana.

con la liberación de iones hidroxilo que son radicales reactivos⁶, oxidantes y letales para la mayoría de los microorganismos” (Tovar, 2022, p. 2).

Por lo expuesto es que la cal no sólo es un referente para la inocuidad alimentaria, sino también para el cuidado de los cultivos y la sanidad pecuaria (Fig. 4).



Figura 4. Aplicaciones en las que la cal es un referente. **Fuente:** Elaboración propia.

“[...] se indica que el hidróxido de calcio presenta un gran potencial para utilizarse como biocida en la agricultura, veterinaria o seres humanos; además, este compuesto cálcico no es fitotóxico⁷, es fácil de usar, barato e inocuo al medio ambiente” Larrea et al., 1995, p. 5).

Existen diversas normas nacionales e internacionales, que avalan el uso de este material para actividades de limpieza y desinfección de espacios destinados al almacenaje y resguardo de alimentos, así como de animales de granja y domésticos.

Básicamente, porque la cal es un material inofensivo y si posee un alto grado de pureza -incluso- puede ser considerado apto para el consumo humano.

“No podemos omitir lo relacionado al uso de la cal para tareas cotidianas como la conservación de los alimentos, ya que ciertas civilizaciones implementaron almacenes con aplanados de cal, no sólo para agua, sino también para granos y otros materiales que requerían aislamiento térmico, pero sobre todo alejar a los insectos” Tovar, 2016, p. 43).

Por otro lado, si bien, el blanco de la cal tuvo un simbolismo especial en la cosmogonía prehispánica, fueron sus transformaciones física y química, las que propiciaron que pueblos mesoamericanos encontrarán en este material a un aliado para actividades tan esenciales como el encalado de paredes (Fig. 5) y el control de plagas.

“[...] conceptos como solidez, color y luz fueron de gran importancia al momento de concebir elementos plásticos, predominantes en estas civilizaciones, como la pintura temática en muros hecha a base de cal, ya que fue una expresión artística que se destinó sólo a ciertos recintos por considerar que la presencia divina se manifestaba mediante la aplicación del color de base, blanco, que por sí mismo era relacionado con la espiritualidad. Creencia aunada a la posibilidad de obtener una mayor intensidad lumínica al recibir los rayos del sol” Tovar, 2016, p. 41).

Asimismo, la cal ha sido utilizada en el campo de las artes, sobre todo porque gracias a su higroscopia o alta retención de agua, los estucos o aplanados tienen la posibilidad de absorber los pigmentos más allá de la capa superficial, consiguiendo así su

6. Especie química que se caracteriza por tener uno o más electrones desapareados.

7. Sustancia considerada como venenosa para las plantas o inhibidoras de su crecimiento.

duración o permanencia por más tiempo; es el principio básico de la pintura al fresco, técnica que alcanzó su máximo esplendor en Europa durante el siglo XVI y en México, como parte del muralismo, movimiento que plasmaba los momentos representativos de la historia en las paredes de los edificios.



Figura 5. Encalado de muros.

Otro ámbito que se ha visto -sustancialmente- favorecido con la cal y sus propiedades, ha sido el de la construcción. De hecho, el más amplio conocimiento que se tiene en torno a ella, es en esta actividad. La mayoría de las personas sabe que la cal se utiliza para el pegado de tabiques y su recubrimiento; algunas de ellas, hasta se han aventurado a utilizarla de manera empírica, teniendo como única guía las experiencias de sus ancestros.

“La significación cultural de un fenómeno [...] puede consistir en que se haga ostensible⁸ en calidad de fenómeno masivo, factor básico de la vida cultural contemporánea. Sin embargo, a continuación, el hecho histórico que asume ese papel es lo que debe resultar inteligible desde el punto de mira de la significación cultural y asimismo desde el de su origen histórico debe ser explicable causalmente” (Weber, 1981, p. 32).

Esto, porque el encalado de construcciones tiene antecedentes históricos, que van más allá de la reflexión de los rayos solares, para impedir las ganancias térmicas al interior de los espacios. La cal, durante siglos, se ha utilizado para la conformación de espacios asépticos⁹; por ejemplo, el encalado de las bardas perimetrales de cementerios, obedece a un principio de neutralización de agentes nocivos o bacterianos, procedentes de la materia orgánica en descomposición.

“La cal mata los bacilos tíficos y coléricos. También impide la putrefacción de los líquidos de cultivo. Pierde su poder antiséptico cuando entra en combinaciones insolubles¹⁰ (carbonatos, sulfatos y sales orgánicas). Para que la cal sea antiséptica es preciso, pues, que el líquido

8. Que pueda manifestarse.

9. Esterilizados. Libres de suciedad y gérmenes dañinos para el ser humano.

10. Que no pueden disolverse.

consERVE una alcalinidad suficiente. [...] El agua de cal se emplea también en la difteria¹¹ como disolvente de las falsas membranas. Se emplea en gargarismos, irrigaciones y pulverizaciones. Se ha recomendado contra la amigdalitis crónica, la faringitis, la gingivitis. Usase también como antiácida y absorbente en las enfermedades del estómago. Es útil contra los vómitos rebeldes y las diarreas. Pueden aprovecharse sus propiedades antipruriginosas¹² en las afecciones de la piel” (Gárate, 1994, p. 108).

La cal es una excelente opción para el tratamiento de diversos padecimientos. Se sabe que a principios del S-XX durante la influenza española, las autoridades en México, solicitaron como medida sanitaria, el empleo de lechada de cal, para tratar de evitar la propagación acelerada de los contagios (Fig. 6).

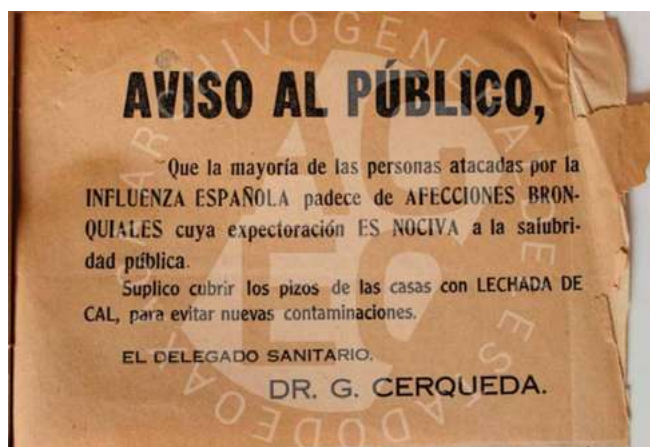


Figura 6. Medidas sanitarias en México.

Fuente: (<https://www.eluniversal.com.mx/opinion/mochilazo-en-el-tiempo/lo-que-aprendimos-de-la-influenza-espanola/?fbclid=IwAR02ftEcVm5VOOz9oR-D6oAUrSDLS0fZ8NI1WRJNNMSVV0f7FEZz-zOw7Re4>)

Estas prácticas, tal como enuncia Durkheim: “[...] sólo disposiciones muy generales, muy vagas, expresando los caracteres comunes a todas las experiencias particulares, pueden sobrevivir y pasar de una generación a otra” (2004, p. 98).

Con ello, se pretende evidenciar, que estos tratamientos pueden ser evaluados y retomados como una opción eficaz o al alcance de muchas personas, especialmente en comunidades vulnerables, que carecen de infraestructura y de los recursos necesarios para vivir bajo condiciones de higiene y salud.

Finalmente, se debe resaltar que con el transcurso del tiempo y la modificación de los sistemas constructivos en el país, la cal se adecuó a los nuevos requerimientos y estándares de la edificación, por lo que la industria calera en México ha buscado la forma de optimizar sus procesos y apegarse a condiciones que garanticen el menor impacto ambiental posible; posicionando a la cal como un material de construcción que además, puede ser considerado en actividades que contribuyen a mitigar el cam-

11. Enfermedad infecciosa y epidémica, que afecta las vías respiratorias superiores.

12. Antipicazón. Que inhiben el prurito.

bio climático global, como la desulfuración de gases, el tratamiento de los desechos orgánicos y la remediación de suelos contaminados. Eso sin mencionar que las superficies recubiertas con cal tienen la capacidad de absorber el dióxido de carbono circundante, en cantidades pequeñas pero suficientes para generar mejores condiciones ambientales, principalmente, al interior de los espacios, en donde la calidad del aire interior es crucial para mantener óptimas condiciones de habitabilidad.

Guerrero menciona: “[...] es probable que la práctica constructiva, se haya establecido a base de prueba y error; siendo la observación y repetición acciones básicas para la conformación de sistemas con mayor grado de adaptación al entorno social, y por supuesto geográfico” (2013, p. 49).

Es así, como la cal ha permanecido vigente gracias a convencionalismos y ciertos cánones científicos, además de que algunos roles sociales específicos han favorecido, no sólo su producción, sino también su evolución o mejora continua.

Las tradiciones, la labor de difusión y la enseñanza de las técnicas de aplicación en regiones en donde la cal es conocida y reconocida han desempeñado un papel fundamental para que, pese a las innovaciones tecnológicas, la cal siga siendo considerada como un producto efectivo y asequible para muchas personas.

Juan de Villanueva, máximo representante de la arquitectura neoclásica española indicaba que: *“Materiales y técnica están íntimamente ligados, la cal es más que un material, es un proceso, una técnica”* Por eso, se dice que las aplicaciones de la cal deben ser dominadas para obtener los mejores resultados.

Obviamente, siendo esta recomendación aplicable a cualquier proceso que considere o demande del uso de cal.

El beneficio socio-ambiental del uso de cal

Es evidente que la sociedad en México, presenta un claro rasgo de ambivalencia y disparidad en el uso de la cal, por eso, la principal razón para difundir los beneficios que esta ofrece, es que en algunos foros se le ha estigmatizado, por considerarla como un material que se reserva para cierto sector de la población o que se identifica con las construcciones rurales y antiguas. La falta de conocimiento, en relación a la variedad de categorías de uso y su consecuente impacto benéfico, ha propiciado que las nuevas generaciones tengan una idea poco certera de lo que es la cal y sobre todo, para qué es útil.

“El uso de la cal como insumo indispensable en diversas industrias, es uno de los materiales que mayor beneficio brinda a la sociedad. [...] Siempre hemos pensado que la verdadera virtud de la cal, es que se consigue mucho con tan sólo una pequeña cantidad de ella. Las reacciones que experimenta son equiparables a las que se obtienen a través de sustancias más complejas o con un proceso industrializado más sofisticado, detrás. Aunado a esto, la cal es fácil de usar, nosotros recomendamos que haya equipo de protección de por medio, pero la verdad es que la cal -por sí misma- no es dañina y su grado de toxicidad es bajo [...]” (Tovar, 2022, p. 39).

La cal ha sido un elemento clave para el desarrollo de la vida, tal como se conoce actualmente, por lo que es necesario que desde el sector empresarial, el académico y

el gubernamental, se hagan esfuerzos que promuevan su aprovechamiento y sobre todo, que induzcan a nuevas líneas de investigación y motiven a la generación de propuestas que permitan que sus beneficios sean para todos.

De igual forma, se debe considerar que las diversas aplicaciones de la cal tienden a contrarrestar los impactos ambientales adversos de ciertas actividades antropogénicas y que para la mitigación / adaptación al cambio climático, este material resulta ser una de las mejores opciones, no sólo en el aspecto económico, sino también en el social.

Agradecimientos

Esta publicación se ha realizado como parte de las actividades programadas en el marco del proyecto LINCGLOBAL VIBRA-IS, financiado en la convocatoria 2022 por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de la Unión Europea, con referencia LNCGL20023.

Referencias

- Calidra (2009). *Cien años en la Industria Calera de México*. México: DGE | Equilibrista.
- Coloma, G. (2008). *La cal. ¡Es un reactivo químico!* Chile: De Re Metallica Ingeniería Ltda.
- Durkheim, E. (2004). *Educación y Sociología*. México: Colofón S. A.
- Gárate, I. (1994). *Artes de la Cal*. España: Editorial de los Oficios.
- Guerrero, L. (2013). *La cal – historia, propiedades y usos*. México: Barba, L. / Villaseñor, I. (ed.) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Larrea, E. (et al.) (1995). *Efecto biocida del hidróxido de calcio y la importancia de su utilización en la agricultura*. México: Asociación de Fabricantes de Cal A.C.
- Tovar, R. (2016). *La cal. Ciencia, técnica y arte*: México. Editorial Trillas.
- Tovar, R. (2019). *Usos cotidianos de la cal*. México: Editorial Trillas.
- Tovar, R. (2022). *Construyendo con cal, naturalmente*. México: Anfacal A. C.
- Tovar, R. (2022). *La cal es para todo*. México: Anfacal A. C.
- Usedo, R. (2015). *Estudio y análisis de la utilización de la cal para el patrimonio arquitectónico*. Trabajo Final Máster en Conservación del Patrimonio Arquitectónico. España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Weber, M. (1981). *Sobre la teoría de las ciencias sociales*. México: Premia Editora de Libros.

Capítulo 11

Problemas de Drenaje Pluvial en Ciudades con Suelo Kárstico, Caso: Propuestas de Solución para la Ciudad de Mérida, Yucatán, México

José Rogelio Pérez Monsrreal, Zenón Medina Domínguez y José Antonio Peniche Gallareta

Correos electrónicos: oeperes@yahoo.com.mx
direccion@iplansa.com.mx
tonypenicheg@gmail.com

Resumen

Este documento "Problemas de Drenaje Pluvial en Ciudades con Suelo Kárstico, Caso: Propuestas de Solución para la Ciudad de Mérida, Yucatán, México" presenta una investigación sobre las inundaciones que han afectado a la ciudad de Mérida en los últimos años debido a lluvias y precipitaciones extraordinarias. Los autores del estudio proponen soluciones para mejorar el drenaje pluvial en zonas con suelo kárstico y proteger a la ciudadanía de futuras tormentas.

El documento comienza con una introducción que describe las inundaciones sin precedentes que ocurrieron en Mérida en 2020, especialmente en el norte de la ciudad donde se encuentran las nuevas urbanizaciones. Luego, se presenta una revisión bibliográfica sobre los problemas de drenaje pluvial en ciudades con suelo kárstico y se discuten los resultados del estudio.

Los expertos analizan los resultados en el contexto de la hipótesis y comparan los hallazgos con estudios anteriores. Identifican las limitaciones del estudio y sugieren futuras investigaciones. En la conclusión final, se destaca la urgente atención que requiere el drenaje pluvial de la ciudad de Mérida para evitar desequilibrios e inundaciones como las vividas en 2020.

Las propuestas para mejorar el drenaje pluvial incluyen planeación, estudios previos y conocimiento de las precipitaciones, condiciones del subsuelo y comportamiento de la hidrología superficial y subterránea. El crecimiento urbano disminuye la superficie de infiltración dando lugar a descargas puntuales más intensas que no tienen la capacidad de absorber en el subsuelo, lo que provoca inundaciones.

Palabras clave: manejo integral del agua, drenaje pluvial, inundaciones, península de Yucatán, tormentas tropicales.

Abstract

This document titled "Stormwater Drainage Issues in Cities with Karstic Soil, Case: Proposed Solutions for the City of Mérida, Yucatán, Mexico" presents research on the flooding that has affected the city of Mérida in recent years due to

heavy rains and extraordinary precipitation. The study's authors propose solutions to enhance stormwater drainage in areas with karstic soil and protect the citizens from future storms.

The document begins with an introduction describing the unprecedented floods in Mérida in 2020, particularly in the northern part of the city where new developments are located. Subsequently, a literature review on stormwater drainage issues in cities with karstic soil is presented, and the study's findings are discussed.

Experts analyze the results in the context of the hypothesis and compare the findings with previous studies. They identify the study's limitations and suggest avenues for future research. In the final conclusion, the document emphasizes the urgent attention needed for Mérida's stormwater drainage to prevent imbalances and floods like those experienced in 2020.

Proposals to improve stormwater drainage include planning, pre-studies, and understanding precipitation patterns, subsurface conditions, and the behavior of surface and groundwater hydrology. Urban growth reduces infiltration surfaces, leading to more intense point discharges that lack the capacity to be absorbed underground, resulting in flooding.

Keywords: Integrated water management, stormwater drainage, floods, Yucatán Peninsula, tropical storms.

Introducción

En 2020, Mérida, Yucatán enfrentó inundaciones sin precedentes debido a lluvias y precipitaciones extraordinarias, especialmente en el norte de la ciudad, donde se encuentran las nuevas urbanizaciones. A pesar de haber experimentado fenómenos hidrometeorológicos similares en el pasado, como el huracán Isidoro en 2002, pero los acontecimientos ocurridos en el año 2020, por las tormentas tropicales Cristóbal, Delta y Gamma que provocaron la elevación del nivel freático e inundaciones en diversos sectores de la ciudad, afectando la vida de la ciudadanía en fraccionamientos, colonias, comisarías, viviendas y edificaciones. Debido a esto, la Dirección de Obras Públicas del Ayuntamiento de Mérida solicita la participación ciudadana por medio expertos en el tema y en coordinación del Colegio de Ingenieros Civiles de Yucatán A.C., para proponer mejoras a los sistemas existentes, obtener nuevas propuestas y optimizar el drenaje pluvial de la ciudad para evitar inundaciones y reducir el impacto al acuífero.

Hipótesis

La implementación de un programa integral de mantenimiento, la construcción de nuevos sistemas de drenaje pluvial en zonas críticas y la mejora de la capacidad hidráulica de los sistemas existentes contribuirán significativamente a la reducción de inundaciones y al mejoramiento de la resiliencia urbana en el municipio de Mérida, Yucatán.

Metodología

La metodología que se emplea es una “metodología mixta” o “enfoque de investigación mixto” que combina la revisión bibliográfica, análisis de datos oficiales y la colaboración de expertos mediante mesas de discusión. La investigación se fundamenta en datos históricos del clima y precipitación pluvial, un censo detallado de los sistemas de drenaje de Mérida, estudios sobre la relación entre precipitación pluvial y niveles de agua subterránea, y otros estudios previos realizados en la zona.

Se consultaron múltiples fuentes, incluyendo datos de la CONAGUA, estudios de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y trabajos de expertos locales como el Ing. Zenón Medina. Además, se revisaron estudios y documentos relacionados con el desarrollo urbano, hidrogeología, geología, política de gestión del agua y riesgos naturales en la región.

La metodología aplicada en este estudio permite un enfoque integral y multidisciplinario para abordar los problemas de drenaje pluvial en Mérida y proponer soluciones adecuadas basadas en un sólido marco teórico y empírico.

El documento presenta una descripción detallada de los antecedentes, análisis y diagnóstico que llevaron a la propuesta para mejorar el sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Mérida, Yucatán. A continuación, se presenta un resumen de cada uno de estos aspectos:

Antecedentes: El documento comienza con una breve reseña histórica del desarrollo del sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Mérida, desde sus inicios hasta la actualidad. Se mencionan los primeros sistemas construidos en la ciudad y cómo han evolucionado a lo largo del tiempo.

El análisis se enfoca en tres aspectos principales: el conocimiento del inventario de la infraestructura del drenaje pluvial existente, el diagnóstico y eficiencia del drenaje pluvial existente y el balance de la precipitación regional, comportamiento del subsuelo y movilidad del nivel freático.

El diagnóstico se basa en los resultados obtenidos durante el análisis previo. Se identificaron varios problemas relacionados con el sistema de drenaje pluvial existente, como la falta de mantenimiento adecuado, la obsolescencia tecnológica y las limitaciones físicas. También se identificaron problemas relacionados con las condiciones hidrológicas locales, como las precipitaciones intensas y las características geológicas del subsuelo.

Resultados de la investigación: Como antecedentes históricos se presenta una breve reseña histórica del desarrollo del sistema de drenaje pluvial en la ciudad de Mérida. Se mencionan los primeros sistemas construidos en la ciudad y cómo han evolucionado a lo largo del tiempo. También se describen algunos de los problemas que han surgido a lo largo de la historia del sistema de drenaje pluvial en Mérida.

También se describe la geología regional de la ciudad de Mérida. Se incluyen detalles sobre la estratigrafía local, que es el estudio de las capas rocosas y su disposición en el subsuelo. También se describe la topografía de la ciudad, que es el estudio de las características físicas y geográficas del terreno. Finalmente, se incluye información sobre el clima local.

En cuanto a la hidrología superficial y subterránea en el estado de Yucatán, donde se encuentra ubicada la ciudad de Mérida. Se incluye información sobre los recursos hídricos superficiales, como ríos y lagunas, así como sobre los recursos hídricos subterráneos, como acuíferos y pozos profundos. También se proporciona una sinopsis geohidrológica del estado para entender mejor cómo funciona el ciclo hidrológico en esta región de manera clara y concisa.

Discusión e Interpretación, los expertos analizan los resultados en el contexto de la hipótesis. Comparan los hallazgos con estudios anteriores y explican las posibles implicaciones de esos resultados. Identifican las limitaciones del estudio y sugieren futuras investigaciones.

Conclusiones: Se resume puntualmente cada uno de los impactos en la forma que se está urbanizando Mérida en los últimos años:

Construcción de pozos: La construcción de pozos en la ciudad de Mérida ha tenido un impacto significativo en el sistema hidrológico local. La extracción excesiva de agua subterránea para uso doméstico, industrial y agrícola ha disminuido el nivel del agua subterránea y ha provocado la subsidencia del suelo. Además, la construcción de pozos puede aumentar el riesgo de contaminación del agua subterránea.

Hidrología subterránea: La hidrología subterránea es un factor importante a considerar en la urbanización de Mérida. La ciudad se encuentra sobre una roca caliza altamente fracturada que permite una rápida infiltración del agua de lluvia hacia el subsuelo. Sin embargo, la urbanización puede disminuir la capacidad del suelo para absorber el agua y aumentar el riesgo de inundaciones.

Precipitación y evaporación anual: La precipitación y evaporación anual son factores importantes a considerar en la urbanización de Mérida debido a su clima tropical húmedo. El aumento en las áreas urbanizadas puede disminuir la capacidad del suelo para absorber el agua y aumentar el escurrimiento superficial, lo que puede provocar inundaciones.

El escurrimiento es otro factor importante a considerar en la urbanización de Mérida debido a su topografía plana. El aumento en las áreas urbanizadas puede disminuir la capacidad del suelo para absorber el agua y aumentar el escurrimiento superficial, lo que puede provocar inundaciones. Además, el escurrimiento puede transportar contaminantes y sedimentos a los cuerpos de agua, lo que puede afectar la calidad del agua.

En resumen, la construcción de pozos, la hidrología subterránea, la precipitación y evaporación anual y el escurrimiento son factores importantes a considerar en la urbanización de Mérida debido a su impacto en el sistema hidrológico local.

A manera relevante se proporcionan recomendaciones para la práctica, la política o la investigación futura. A continuación de enlistan y describen cada una de las recomendaciones para el mejoramiento del drenaje pluvial en la ciudad de Mérida, Yucatán:

1. Nueva sección administrativa de drenaje pluvial en el Ayuntamiento: Se recomienda crear una sección exclusiva dentro del Ayuntamiento para atender la operación, mantenimiento y proyectos del drenaje pluvial. Esta sección estaría encargada de procurar el adecuado comportamiento de los sistemas que vierten e infiltran las aguas de la precipitación, así como las aguas residuales obtenidas de las plantas de tratamiento y de re-uso del área urbana, industrial y de riego.
2. La Formación de un consejo consultivo con la participación colegiada de expertos y profesionales en el área del drenaje pluvial. Este consejo estaría encargado de asesorar al Ayuntamiento en la toma de decisiones relacionadas con el drenaje pluvial.
3. Se recomienda utilizar técnicas constructivas adecuadas para mejorar el funcionamiento del sistema de drenaje pluvial. Estas técnicas incluyen la construcción adecuada y mantenimiento periódico del sistema, así como la utilización adecuada y mantenimiento periódico del equipo necesario para su operación.

Las prácticas que deben evitarse, mejorarse y nuevas prácticas.

Impacto en la forma que estamos urbanizando de Mérida en los últimos años.

Construcción de pozos.

La formación de los domos en los pozos de inyección se debe a la gran cantidad inyectada de agua artificialmente al subsuelo, que hace subir los niveles de agua, el nivel freático, el nivel de agua dulce y agua salobre, sobre todo por la falta de absorción, también impide el paso de agua natural por desnivel hacía en mar. Y revierte el sentido del flujo del acuífero en esa zona, ocasionado por la obstrucción de las grietas al disolver y arrastrar la arcilla y suelos finos que están en el subsuelo, causando las inundaciones que pudimos ver y vivir.

En este esquema del comportamiento del agua en pozos de descarga y extracción, se trata de mostrar la elevación del acuífero salobre tanto por la inyección como por la extracción del agua, obstruyendo, revirtiendo y cambiando el sentido de flujo del agua al mar (Figura 1).



Figura 1. Esquema del comportamiento del agua subterránea en pozos de descarga y extracción respecto al nivel del mar de Yucatán.

Fuente. Elaboración propia a partir de la experiencia del Ing. Rogelio Pérez.

De igual manera se tiene que tomar en cuenta en el caso de la ciudad los siguientes aspectos

- **Hidrología subterránea:** La topografía es plana con una altura que varía entre 4 y 10 m sobre el nivel medio del mar.
- **Precipitación y evaporación anual:** La mayor parte del agua precipitada se almacena en los acuíferos, quedando libre de los efectos de la evaporación.
- **Escurrecimiento:** Durante el proceso de escurrecimiento, cierta parte del agua que fluye por el subsuelo se almacena en los acuíferos, por lo tanto, no toda el agua precipitada llega a la zona de descarga.

Adecuación de los sistemas existentes que presentan problemas

Mantenimiento y limpieza. Mantenimiento urgente requerido.

La infraestructura del drenaje pluvial del municipio de Mérida y de su capital es variable, extensa y requiere condiciones óptimas de operación; el 80% está conformado por pozos y zanjas colectoras con una operación deficiente en los picos para el desalojo rápido que evite inundaciones, molestias y deterioro al pavimento.

En el sistema de drenaje actual se refleja el 74% de pozos limpios y el 26% restante presentan algún tipo de azolve, por lo que se requiere se efectúen trabajos de mantenimiento y limpieza; con énfasis en el actual sistema para el sector V el cual presenta mayor azolve con un porcentaje de 37% contrariamente el sector II que requiere poco servicio de mantenimiento (información presentada por el H. Ayuntamiento).

Se propone iniciar un mantenimiento intenso y correctivo en todos los sectores de la ciudad, este incluye reparación, sustitución, reubicación de rejillas de captación y zanjás; reconstrucción de las cajas de captación e infiltración adecuada para evitar que la contaminación continúe, en lugar de construir nuevos pozos de recarga. Es importante adecuar apropiadamente el vertido del agua hacia el acuífero (Figura 2).



Figura 2. Rejilla sumergida como resultado de pozo azolvado. **Fuente:** Elaboración propia.

Funcionamiento de zanjás y su capacidad de infiltración

La zanja es una excavación que se realiza con el propósito de absorber cierto volumen de agua que escurre sobre el pavimento, las hay de diversas dimensiones en las que el área de recolección va de los 2 m² hasta los 5 m², en algunas de éstas en la parte del fondo conviene realizar varias perforaciones dependiendo de la superficie, traspasando el espesor de estrato de roca dura hasta llegar a sahcab o un estrato permeable, permitiendo el paso del agua de mejor manera. En las actuales zanjás, para su mantenimiento, se recomienda el retiro de basura y material acumulado en su interior, para posteriormente proceder a la limpieza de las perforaciones existentes con el mismo equipo.

En el actual sistema, ya sea en el interior de la zanja o de forma externa se le construye un pozo de recarga adomado y con ranuras desde la zona de la zanja, permitiendo el paso de finos, productos disueltos, grasas y aceites hasta una profundidad de 12 m, obstruyendo rápidamente el mismo, este método deberá modificarse a zanjás de absorción o combinarlo con pozos areneros, así como cambiar la forma de vertido, sellando el adome en la zona de la zanja e instalar una estructura doble.

Determinación de áreas tributarias

La longitud total de las vialidades (calles y avenidas) dentro del anillo periférico es aproximadamente de 3,308 km; se estima que las vialidades de la ciudad de Mérida al interior del anillo periférico tienen una longitud de 180.0 m/Ha. Es decir, del 25% al 35% de la ciudad esta pavimentada e impermeabilizada solo por el rubro de vialidades. Se requiere hacer mediciones con mayor precisión y determinar la longitud y ancho de calles pavimentadas, así como obtener sus niveles, calcular la superficie de escurrimiento y así poder precisar el área tributaria y la correspondiente hidráulica requerida para cada caso en específico y así determinar el sitio o los sitios más adecuados para la disposición final del agua acorde a la permeabilidad del suelo de la zona.

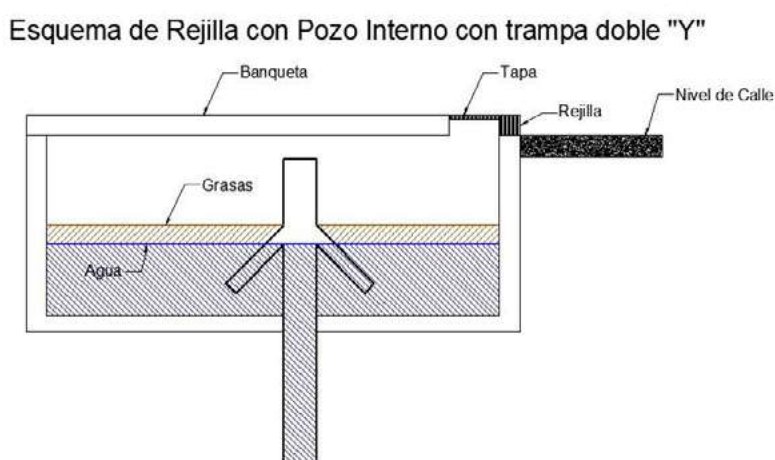


Figura 3. Esquema de rejilla con pozo interno con trampa "Y".

Fuente: Elaboración propia.

Limpeza de calles

En la ciudad de Mérida se ha observado que existen calles con presencia de basura, polvos, hierbas, etc.; que en épocas de lluvia son arrastradas hacia las alcantarillas acumulándose y obstruyendo la infiltración de agua a los sitios de colecta y disposición final. Aparte se requiere generar conciencia en la ciudadanía mejorar los sistemas de recolección y limpieza urbana para evitar estos problemas. "Una ciudad limpia no es la que más se barre sino la que menos se ensucia".

Obra de colecta, descarga, absorción y recarga

Se requiere que la construcción de zanjas o areneros sea en banquetas, con rejillas verticales en la guarnición debidamente ancladas y reforzadas estructuralmente, se debe realizar los análisis de cargas, para cada tipo de sistema, de tal forma que la

estructura resista el peso del tránsito correspondiente. Estas obras que usualmente se hacen en la superficie de rodamiento, deberán estar preferentemente en la banquetta y su colecta debe ser en una rejilla vertical; tanto por el funcionamiento, el mantenimiento como por el costo de su construcción (Figura 9).



Figura 4. Ejemplo de Brocal prefabricado.

Fuente. Foto del fabricante.

Elementos de sistema de drenaje

Areneros – trampas de grasa

Las zanjas colectoras y pozos areneros deberán hacer la función de absorción y estar interconectados con los pozos de recarga. En las zanjas existentes con pozo en el interior de la misma, se deberá de sustituir el ademe del pozo ranurado superior existente por un tubo liso y con una doble “y” haciendo la función de desnatador y decantador.



Figura 5. Zona impermeable con escurrimiento a zona permeable.

Fuente. Foto propia.

Aprovechamiento de las zonas y superficies permeables

En algunas vías existen zonas permeables en camellones y en áreas verdes que están a menor nivel del pavimento y que sin embargo existe una guarnición que impide el paso del agua hacia la zona permeable; sugerimos la modificación de esa guarnición para que el agua que se acumula en la zona impermeable se conduzca a la zona permeable ayudando a drenar estas inundaciones mejorando el drenaje tanto por la infiltración como por el volumen que pueda acumular instantáneamente.

Análisis crítico de los problemas directos e indirectos del drenaje pluvial de Mérida

Problemática en los actuales pozos pluviales

En el reglamento de construcciones del municipio de Mérida en el artículo 153 señala que al urbanizar hay que perforar 1 pozo cada 350m² de pavimento (sin considerar los niveles ni la superficie tributaria correspondiente). En el art. 155 se especifica la construcción de pozos de descarga (recarga); no se considera la contaminación al acuífero que la descarga está generando. De tal forma que se vierte directo al acuífero además del agua, también polvos, excretas de pájaros, perros, hule de llantas, polvo de frenos, aceites de vehículos y demás que entran a obstruir e impermeabilizar el pozo y las grietas por donde se infiltra el agua en el acuífero. Es relevante la presencia de polvos finos que genera la industria en los diferentes campos como la producción de agregados pétreos, por medio de la trituración, plantas de asfalto, productos terminados del concreto, la industria alimentaria, la presencia de herbicidas en el campo, el transporte en sus diversas modalidades, entre otros, nos hacen replantear la necesidad de un control total de los procesos contaminantes del agua

Esto también ocasiona problemas y altos costos de mantenimiento; se dispone de un departamento dedicado a la limpieza y desazolve, que incluso utilizan productos inapropiados para intentar devolverle parte de la permeabilidad al subsuelo y al pozo. De manera similar se emplea este procedimiento en la limpieza y desazolve de los pozos de absorción del drenaje domiciliario.

Deficiencias en el diseño y construcción de pozos

Quizá por desconocer el funcionamiento del acuífero y pretender la reducción de costos en la construcción pozos, es común en la práctica colocar sellos sanitarios de concreto en la parte superior y en el nivel donde se pretende sellar el acuífero, dejando libre, sin sellar e intercomunicando la parte intermedia del acuífero entre ambos sellos. Razón por lo que los supuestos sellos sanitarios no lo son. El movimiento y flujo del acuífero no es solo horizontal con tendencia al mar sino también vertical. Razón de esto.

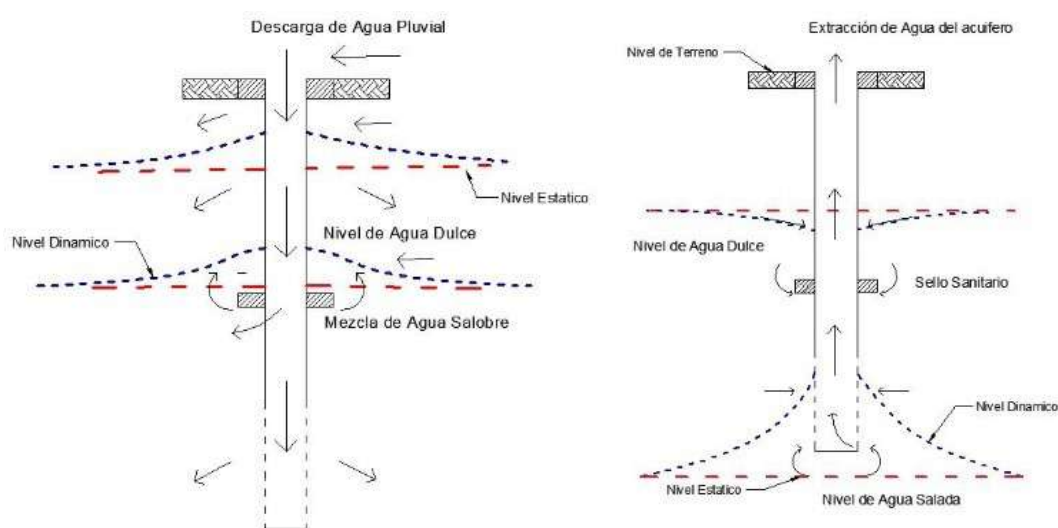


Figura 6. Movimiento y flujo del acuífero (descarga y extracción actual del agua).

Fuente: Elaboración propia.

Los pozos deben de ser construidos con el sello de concreto de resistencia media a lo largo y alrededor de todo el espacio entre la excavación y la tubería del ademe y entre los dos anillos, para evitar la mezcla rápida y no natural en toda la profundidad entre los sellos; en pozos sin sello se puede observar durante y después de una lluvia que el agua más superficial cae bruscamente, desde la parte más superficial y sin ser filtrada por el subsuelo en forma directa al acuífero con todo lo que arrastra desde la superficie. Esto ocurre en los cenotes que se contaminan con el arrastre de la infiltración (excretas, polvos, aceites, etc.) para lo cual, en este caso, se trata de proteger con la normatividad correspondiente.

No existe un verdadero control ni registro de todos los pozos

Fuera de los que CONAGUA tiene registrados porque requieren algún tipo de concesión, no existe un verdadero control ni registro de ningún tipo de pozos. Ni tampoco de las compañías que los perforan, por lo que cada quién hace lo que cree y muchos de esas compañías requieren una mayor preparación en el área hidráulica y también sanitaria; este impacto es grave y se considera prioritario.

Se observa la necesidad de un control institucional y legislar sobre una nueva ley estatal de aguas, que permita conocer y normar los diseños de perforación de pozos y las descargas al acuífero, siendo necesario contar con los proyectos ejecutivos adecuados, la supervisión de la obra, para verificar el estado de final de la perforación y sellos, así como los aforos correspondientes.

¿Por qué no se deben hacer descargas puntuales de agua residual (pluvial, doméstica, industrial o cualquier tipo) al acuífero?

Consecuencias de la inyección del agua en el acuífero profundo salobre

La inyección al acuífero profundo pretende justificar, el supuesto que bacterias y virus no sobreviven en agua salobre: esta afirmación es una falacia, pero a esas profundidades el suelo está compuesto de arcillas carboníferas impermeables (margas y lutitas), que no son capaces de absorber más de 3-4 l/s, por pozo y siempre las descargas de aguas residuales de las plantas (PTAR) son mayores, por lo que el agua que se inyecta a gran velocidad remueve las arcillas, limos y suelos medianamente compactos por la naturaleza; como el agua dulce es menos densa que la salada, sube arrastrando éstas partículas que obstruyen e impermeabilizan las grietas de la parte del subsuelo. Así mismo, y debido a la discontinuidad del sello sanitario, el agua dulce se eleva rápidamente, creando un domo en los niveles de los acuíferos dulce y salado, impidiendo su evacuación hacia el mar, que revierte el flujo por ambas causas. Este fenómeno contamina con minerales y materia orgánica toda la parte más protegida del acuífero aprovechable y demuestra la correspondencia entre drenaje pluvial y las descargas de aguas domésticas tratadas, ya que ambas afectan todo el acuífero y se correlacionan.



Figura 7. Acuífero aprovechable.

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de flujo de agua y desalojo dependen entre otras cosas de la energía potencial o de altura (Bernoulli-Darcy), eso significa que mientras mayor sea la diferencia de alturas entre el punto inicial de descarga y el final, que es el mar, mayor es la velocidad de desalojo (gradiente), así si se vierte en Mérida en el suelo con cerca de 8.0 m de diferencia de altura al mar (pendiente de 2.0 m cada 10.0 km), es mayor que verter al acuífero cuyo gradiente es en promedio 1.0 m sobre el nivel medio del mar

(pendiente de 0.25 m cada 10.0 km), adicionalmente que el subsuelo se convierte en una caja de tormenta debido a la porosidad y a las oquedades para absorber los volúmenes de los picos de las lluvias más fuertes.



Figura 8. Calles sin pavimentar, donde la parte transitada se compacta e impermeabiliza.

Fuente. Elaboración propia.

La circulación natural del agua en el subsuelo de la entidad está en función de la estructura, lo que nos permite conocer la transmisividad del acuífero, con un gradiente de 4 a 15 centímetros por kilómetro (4 - 15 cm/km). Analizar la red de flujo del agua subterránea, así como la movilidad de aguas freáticas ante los fenómenos de extracción y recarga habitual en el área urbana y en periodo de huracanes y tormentas extraordinarias han provocado inundaciones relevantes por este desequilibrio en la movilidad del flujo de aguas subterráneas.

Otro factor de velocidad de flujo es la fricción que se da tanto por el recorrido como por la distancia y el paso a través de las grietas por lo que, si se llegaran a obstruir con los sólidos del agua vertida, el área disminuye y hay más fricción, por lo tanto, menos velocidad, además de descargar en zona de suelo saturado. Adicionalmente se debe considerar la forestación de la ciudad ya que las raíces de los árboles abren grietas, cosa que ayuda a tratar el agua adicionando oxígeno de la fotosíntesis, absorbe componentes contaminantes como nitrógeno, fósforo y parte de esa agua se transpira (fitorremediación) además que estas grietas permiten mayor infiltración aumentando la porosidad del suelo.

Se recomienda tener unidades de medición piezométrica para la determinar la velocidad del flujo del agua con respecto al gradiente hidráulico y las características del subsuelo y así se podrá determinar el comportamiento del acuífero subterráneo.

Otro gran problema que afecta al municipio de Mérida es la intrusión salina al construir puertos de abrigo sin sellar el suelo propicia que el agua salada se introduzca a la zona de agua dulce; adicionalmente las descargas de agua sobrecargada de sales producto de la suavización y desmineralización de las aguas para fines industriales (esto está reportado en varios estudios de Tahal, BGS y particulares desde hace más de 30 años) sin que sea considerado como impacto ambiental. **La franja salobre da lugar al fenómeno denominado Haloclina** (es una capa de agua en la que la salinidad cambia bruscamente con la profundidad en donde se mezcla agua dulce con agua de mar), **la cual es altamente intrusiva y erosionante del suelo kárstico**. Este fenómeno nos obliga a conocer la variabilidad y movilidad del agua subterránea, así como la proporción de los espesores entre el agua dulce y agua salada en los periodos de extracción y recarga al acuífero, especialmente en las zonas próximas a la costa.

Otros fenómenos naturales como la capilaridad, la neblina, el clima, las mareas, y evaporación no son usualmente considerados.

¿Cómo y dónde pueden reusarse las aguas tratadas de las PTAR?

Ejemplo de propuesta en los años 80 para reusar el agua residual en riego de frutales:

A principio de la década de los 80, se inició en Mérida la construcción del Emisor del drenaje sanitario de la ciudad, al respecto, aprovechando la ocasión, una empresa israelí, se ofreció ante el gobierno del Estado, a construir la planta de tratamiento de aguas residuales del sistema contemplado en el Emisor, el costo de la planta de tratamiento de aguas residuales, la administración correría a cargo de la empresa en cuestión; solicitando a cambio la concesión del re-uso del agua en 300 hectáreas de terrenos cercanos durante un período de 15 años; durante este tiempo la empresa en cuestión sembraría árboles frutales, los cuales serían regados con agua tratada proveniente de la planta de tratamiento que construiría. Con este acontecimiento, queda registrada en la ciudad de Mérida, la visión de la factibilidad de poder utilizar las aguas tratadas, en una actividad como la agricultura, que además permitiría una recarga artificial al acuífero mediante infiltración superficial al mismo, ser productivos, continuar el tratamiento en el suelo y subsuelo, oxigenar el aire y otras ventajas más. Cabe mencionar que tal propuesta no fue tomada en cuenta y no se ejecutó por razones que desconocemos.

En síntesis, el re-uso del agua conviene que se disponga en la superficie del suelo y no en recargas al acuífero mediante pozo de absorción. Tal como hace el ciclo natural del agua desde hace millones de años.

Las redes centralizadas de tuberías de drenaje sanitario

Tal vez no sea el sistema más apropiado para el suelo en Mérida debido a la **descarga puntual**. Esto fue señalado en el estudio “IMPACT OF URBANISATION ON GROUNDWATER IN MERIDA, MEXICO: FINAL REPORT” de la BGS-UADY desde 1994. Se observó en los recientes eventos meteorológicos, cuando se inundaron algunas partes que contaban con red de drenaje sanitario, el agua pluvial se mezcló en las alcantarillas, sacó fauna vectora nociva, virus, bacterias y demás sustancias contaminantes al contacto humano y rebasó la capacidad de tratamiento de las plantas y entonces se inyectó a los pozos de descarga, más agua con más sólidos, empeorando la absorción por obstrucción de las grietas y la creación de domos en el acuífero que impedían el paso natural al mar revirtiendo una parte del flujo, cosa que retrasó el desalojo del agua y en muchas ocasiones, se revirtió el flujo de las aguas residuales hacia las viviendas. Se considera que esta situación seguirá ocasionando inundaciones en las zonas registradas.

Se requiere el conocimiento de la funcionalidad y eficiencia de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la integración con el drenaje pluvial.

Desarrollos inmobiliarios

Es importante que, al considerar proyectos de desarrollos inmobiliarios, ya sean éstos habitacionales, comerciales, industriales y de equipamiento se tomen en cuenta los factores que inciden en el diseño del sistema de drenaje pluvial (permeabilidad del suelo, volumen por desalojar, calidad del agua por infiltrar), así como el tomar en cuenta lo establecido en el mapa de riesgo por inundación, ya que en él están establecidas las zonas más susceptibles a sufrir inundaciones por el efecto de la lluvia. Por lo anterior, es importante **establecer las zonas apropiadas para el crecimiento de la ciudad, que sean más adecuadas y conforme a las características físicas del territorio de la ciudad y su zona conurbada**.

El crecimiento de la ciudad y su desarrollo inmobiliario, ha cambiado la infiltración natural del subsuelo, afectando y disminuyendo la permeabilidad natural. Esto significa que, a mayor desarrollo inmobiliario, menor permeabilidad superficial y mayor la probabilidad de inundación ante la presencia de fenómenos meteorológicos extraordinarios.

Se requiere conocer con precisión la topografía de los terrenos a desarrollar en proyectos inmobiliarios, lo que significa que se deben tener disponible esa información con planos que señalen la elevación exacta y su referencia al nivel freático. Todo desarrollo inmobiliario deberá anexar un proyecto preventivo que evite las inundaciones.

Problemas indirectos colaterales al drenaje pluvial.

1. Plantas de tratamiento de aguas residuales domestica-urbana

Se requiere conocer el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como su capacidad de operación y su eficiencia, para determinar la contribución del gasto que se inyecta al subsuelo y conocer la variabilidad del nivel freático asociado a los fenómenos meteorológicos extraordinarios. Es decir, la obtención de parámetros que muestren el comportamiento del nivel freático en la presencia de estos fenómenos, la estratigrafía del suelo y la variabilidad del nivel freático.

2. Desarrollos de vivienda construidos sobre plataformas compactadas. Plataformas de vivienda.

La construcción de la cimentación de viviendas de interés social y residenciales ha sido tradicionalmente con base de una cimentación superficial, procediendo después del trazo a la excavación del suelo vegetal hasta encontrar la roca caliza firme y después de estructurar con mampostería cadenas y castillos armados y colados, el interior era rellenado con material de banco procediendo al acomodo y compactación manual para el apoyo de los pisos y losas de concreto. Actualmente este procedimiento ha sido substituido con la construcción de plataformas y terraplenes sobre toda la superficie del terreno desmontada y despalmada; estas plataformas están empleando materiales producto de la explotación de los bancos, colocado en capas y procediendo a su compactación arriba del 90% de su peso volumétrico seco máximo y con la humedad óptima, con el empleo de maquinaria pesada.

Este procedimiento es un cambio substancial que disminuye el área de infiltración por el desarrollo y construcción de las viviendas de interés social, lo que favorece la inundación del área como una consecuencia natural. Esta perspectiva nos conduce a la necesidad de aplicar la ingeniería en el crecimiento de la ciudad, siendo relevante la urgencia de estudios y de planeación en el desarrollo urbano de la ciudad.

Para la construcción de viviendas en serie sobre todo en zonas de alto riesgo es recomendable evitar la construcción de estas, debido a que la compactación de estas plataformas, impermeabiliza el suelo y sella las grietas. Este procedimiento de construcción de vivienda mediante plataformas se recomienda revisar y evaluar su impacto por lo antes señalado.

Acciones importantes tanto en zonas existentes como en nuevos desarrollos

- A. No eliminar toda la vegetación y el suelo natural;** lo anterior nos conduce a definir procedimientos de construcción que favorezcan el diseño y la construcción de la infraestructura y evite un sellado total de la superficie de infiltración.
- B. Evitar método constructivo de las losas de cimentación y las plataformas compactadas,** para permitir permeabilidad del suelo.

C. Evitar las fugas de agua de tuberías situadas debajo de la losa de cimentación, pueden erosionar la base donde se asienta la vivienda y provocar problemas estructurales, como ha ocurrido en algunas ocasiones (cárcamo del agua potable en colonia Montecristo a finales de los 80)

D. Evitar sistema de drenaje sanitario central, esto en fraccionamientos, por lo anteriormente expuesto.

E. Evitar plantas de tratamiento de aguas residuales con aireación cercana a las viviendas. Debido a la contaminación del aire con virus y bacterias aerotransportadas, que afectarían la salud de las personas.

F. Evitar descargas puntuales de agua residual dulce al manto salino.

G. Falta de control y seguimiento de los proyectos de descargas de aguas residuales: Un ejemplo de la falta de control es el análisis y seguimiento que debió hacerse en el fraccionamiento diamante y de la zona de Tixcacal Opichen, donde una parte se construyó y autorizó intencionalmente con fosas y otra con red de drenaje, PTAR y pozo de inyección, en la década de los 90, para evaluar en pozos de monitoreo el efecto en la contaminación del acuífero; a la fecha no conocemos los resultados de la evaluación de este proyecto.

Propuesta de adecuación de políticas públicas municipales

- **La responsabilidad del Ayuntamiento.**

Art. 115 Constitucional: el municipio es la célula básica de la república, los municipios con el concurso de los Estados, cuando así fuese necesario y lo determinen las leyes tendrán a su cargo, entre otros servicios agua potable, drenaje pluvial y alcantarillado, parques y jardines, entre otros.

- **Propuestas de políticas públicas.**

Se requiere un marco de políticas públicas, avaladas por el congreso del Estado, que se promueva jurídicamente para ordenar y reglamentar los recursos económicos para la investigación aplicada.

- **El nuevo futuro para Mérida.**

Finalmente, Mérida esta llamada a ser un polo de desarrollo del sureste brindando mayor seguridad, bienestar, progreso y la calidad de vida que cada familia requiere. La ingeniería es soberanía, atendamos y cuidemos el drenaje pluvial de nuestra ciudad. La ciudad de Mérida ha sido ejemplo a seguir por otros municipios tanto dentro

del estado de Yucatán, como de toda la región peninsular y del país, conservemos esta dignidad aplicando el conocimiento de la ingeniería en el desarrollo urbano de la ciudad.

- **La Incertidumbre.**

Esta situación ha generado incertidumbre en la ciudadanía y desconfianza hacia los desarrollos inmobiliarios y la vivienda, la cual hace ver a la autoridad municipal que debe atender con elevada prioridad el drenaje pluvial de la vía pública.

- **Mantenimiento y limpieza.**

Con la información proporcionada donde se refleja el 74% de pozos limpios y el 26% restante presentan algún tipo de azolve, se propone efectuar un mantenimiento intenso en todos los sectores de la ciudad, este incluye reparación o sustitución de rejillas, reconstrucción de las cajas de captación y adecuación de los sistemas existentes; Aunado a esto se desconoce la capacidad de absorción de cada pozo.

- **Superficie de calles, longitud y área.**

La longitud de vialidades, entre calles y avenidas, dentro del anillo periférico es aproximadamente de 3,308 km, se estima que la ciudad de Mérida tiene una longitud estimada de 180.0 m/Has. Es decir, el 25% al 35% de la ciudad esta pavimentada. Se requiere medir con más detalle, para determinar la longitud y ancho de calles pavimentadas y obtener la superficie de escurrimiento para precisar el área tributaria y la correspondiente área hidráulica requerida.

- **Funcionamiento de zanjas y su capacidad de Infiltración.**

La zanja es una estructura en la que se realiza una excavación en el pavimento capaz de absorber cierto volumen de agua desplazada sobre el pavimento. Las hay de diversas dimensiones en las que el área hidráulica va de los 2 m² hasta los 5 m²; en algunas de éstas en la parte del firme conviene realizar entre 6 y 10 perforaciones de 1 ¼", dependiendo de la superficie, traspasando el espesor de estrato de roca dura hasta llegar a sahcab, permitiendo el paso del agua con mejor flujo. Para su mantenimiento, se recomienda el retiro de basura y material orgánico acumulado en su interior, para posteriormente proceder a la limpieza de las perforaciones existentes con el mismo equipo.

En otro tipo de zanjas ya sea en el interior de la zanja o de forma externa se le construye un pozo de absorción adomado hasta una profundidad de 12 metros.

- **Obras de captación.**

Se requiere la construcción de zanjas o areneros con rejillas reforzadas con cadena perimetral inferior - superior, y castillos armados en las esquinas, realizar los análisis de cargas, para cada tipo de sistema, de tal forma que la estructura resista el peso del tránsito. Estas obras deberán estar preferente en la banqueta.

- **Plantas de tratamiento de aguas residuales doméstica-urbana**

Se requiere conocer el funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales, así como su capacidad de operación y su eficiencia (en relación a la calidad y cantidad del efluente), para determinar la contribución del gasto que se inyecta al subsuelo y conocer la variabilidad del nivel freático asociado a los fenómenos meteorológicos extraordinarios. Es decir, la obtención de parámetros que muestren el comportamiento y variabilidad del nivel freático de la zona particular en la presencia de estos fenómenos y la estratigrafía del suelo.

- **Complementos del drenaje**

1. **Areneros:** Las zanjas colectoras con función de arenero deberán de estar interconectados con los pozos de absorción, con un máximo de 4 zanjas colectoras; en su caso, se deberá de sustituir el ademe del pozo ranurado superior y conectar con las zanjas colectoras.
2. **Trampas de grasa:** Se propone la incorporación de trampas atrapa grasa o similar con el objeto de dar un tratamiento previo al verter el agua al acuífero.
3. **Descarga al pozo mediante: “Doble Y”.** En las zanjas colectoras que cuenten con pozo de absorción en su interior, se recomienda sustituir el ademe superior ranurado por uno completamente sellado y complementar en su parte superior con una “Yee doble de pvc” invertida y tapón superior.

Rejilla con Pozo Externo

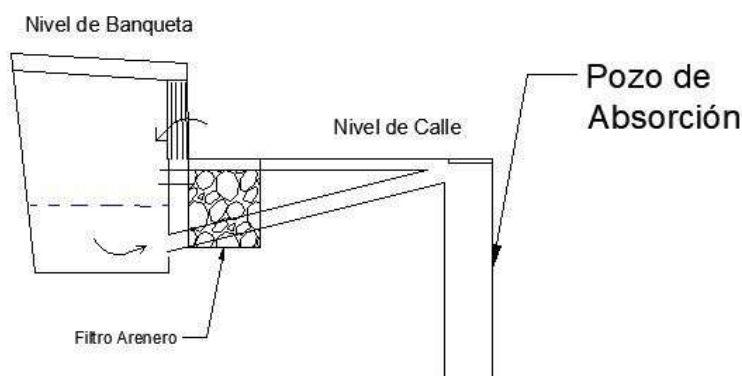


Figura 9. Calles sin pavimentar, donde la parte transitada se compacta e impermeabiliza.

Fuente. Elaboración propia.

Conclusiones específicas y recomendaciones

Las inundaciones recientes en la zona urbana e industrial en toda la ciudad y los fenómenos meteorológicos del 2020, mostraron las limitaciones en el sistema e infraestructura del drenaje pluvial en algunas zonas y fraccionamientos residenciales y de vivienda social en la ciudad de Mérida.

- 1. Crecimiento de la mancha urbana vs. disminución de la superficie de infiltración:** El crecimiento de la mancha urbana, ha sido desordenado; los métodos de construcción para la preparación de la cimentación de la vivienda y de las edificaciones ha provocado el sellado del agrietamiento superficial y profundo de la roca por la presencia de terraplenes con material compactable. Lo anterior está generando un desequilibrio de la naturaleza entre la velocidad de infiltración del agua y el movimiento del nivel de aguas freáticas, por lo que sugerimos aumentar las zonas de captación, regulación e infiltración superficial tal como funciona el espacio central entre los cuerpos del anillo periférico.
- 2. Planeación del crecimiento de la ciudad y los estudios previos, del medio ambiente en la autorización de proyectos inmobiliarios. Aplicación transversal de las disciplinas de la ingeniería:** El crecimiento poblacional de una ciudad y la topografía sensiblemente plana de Mérida requiere de estudios geotécnicos, geofísicos, geohidrológicos, así como la aplicación y presencia de proyectos de ingeniería en la infraestructura del drenaje pluvial. El modelo de crecimiento de una mancha urbana única y gigante, está trayendo impactos negativos. Sugerimos el desarrollo de zonas satélites con todos los servicios, mobiliario, equipamiento e infraestructura como puede ser en las comisarías, daría un crecimiento más equilibrado y sensación de menor abandono.
- 3. Conocimiento del comportamiento del nivel freático en épocas de estiaje y de huracanes. Plano topográfico de la ciudad:** Se requiere establecer un equilibrio entre la precipitación pluvial, y el movimiento del nivel freático con respecto a Mérida y el flujo subterráneo hacia al mar. Es indispensable la elaboración de un plano topográfico de precisión que permita conocer los bancos de nivel en las diferentes zonas de la ciudad que oriente al proyectista sobre el riesgo de posibles inundaciones por desconocimiento del subsuelo.
- 4. Políticas públicas. Mantenimiento y limpieza de las calles y de la infraestructura del drenaje pluvial:** Los proyectos de drenaje pluvial representan la garantía del funcionamiento eficiente y conservación de la infraestructura; forman parte de la memoria en la estructura del proyecto. Se requiere de una institución que garantice la limpieza permanente de la infraestructura previo al período de lluvias.
- 5. Administración y control de la infraestructura:** Es indispensable el inventario de la infraestructura del drenaje pluvial y la medición de su comportamiento mediante aforos de descarga del agua pluvial.

6. **Proyectos ejecutivos para el drenaje pluvial. Determinación de microcuencas:** Para el diseño de un sistema de drenaje pluvial es indispensable la determinación de las microcuencas y el volumen de escurrimiento en el área pública. La integración de proyectos ejecutivos deberá incluir los estudios previos, el diseño de las obras, el conocimiento y dominio de la recarga y de la extracción en los pozos y zonas de absorción. Las aguas residuales se refieren a aguas limpias, producto del tratamiento etc. y deberá ser objeto de una evaluación de su comportamiento de una manera frecuente. Su disposición e impacto deben ser evaluadas cabal y profesionalmente.
7. **Pavimentos en calles y avenidas:** El diseño y la selección de los pavimentos en calles y avenidas está en función del tránsito mezclado (pesado, ligero y autobuses) obteniendo la estructura sea esta de un pavimento flexible con el empleo de mezclas asfálticas o bien, de concreto con el empleo de cemento hidráulico; se incluye también los pavimentos llamados porosos, todos estos deberán contemplar el drenaje pluvial mediante una infraestructura que capte rápidamente el agua y la elimine con prontitud hacia el subsuelo.
8. **En los proyectos portuarios especialmente de Progreso deberá evaluarse el impacto al acuífero aprovechable tanto en calidad como en cantidad y desalojo del agua.**
9. **Considerar el desarrollo de las comisarias como ciudades satélites para equilibrar el crecimiento y desarrollo urbano de la ciudad capital.**

Conclusión

El drenaje pluvial de la ciudad de Mérida requiere una urgente atención para evitar los desequilibrios e inundaciones que se vivieron en el año 2020 en varios sectores de la ciudad.

Atender el problema del drenaje pluvial requiere planeación estudios previos y el conocimiento de las precipitaciones, de las condiciones del subsuelo y el comportamiento de la hidrología superficial y subterránea.

El crecimiento de la ciudad, el desarrollo urbano de Mérida disminuye la superficie de infiltración dando lugar a descargas puntuales más intensas de las precipitaciones que no tienen la capacidad de absorber en el subsuelo dando lugar a inundaciones.

El crecimiento del área urbana hacia el mar, los procedimientos de construcción en los desarrollos inmobiliarios en la vivienda, la elaboración de terraplenes, plataformas y la construcción de calles, han provocado el sello de las áreas de infiltración y una disminución de la zona permeable, provocando una descarga lenta y puntual que han ocasionado las inundaciones recientes.

Referencias

- Ayuntamiento de Mérida, (2018). "Plan Municipal de Desarrollo Urbano 2018".
- Batlíori, E., González, J., Díaz, J., Febles, J., (2006). "Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México".
- Beltrán R., Lizárraga L., Lucho C., Divurra C. (2020). Alternativas para contrarrestar los efectos del sellado antropogénico del suelo. PÄDY Boletín científico de ciencias básicas e ingeniería ICBI Volumen 8. Número 15.
- Casares, (2006). "Consideraciones hidrogeológicas para un desarrollo sustentable en la costa de Yucatán, México".
- Casares, R., Sánchez, I., González R., (2006). "Consideraciones hidrogeológicas para un desarrollo sustentable en la costa de Yucatán, México".
- CEDREP (2020), Censo de Drenaje Pluvial.
- CENAPRED, (2014). "Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México".
- CONAGUA, (2009). "Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (3105) Península de Yucatán estado de Yucatán".
- Foro del Agua (2021), JAPAY pptx. Ing. Chan Lugo.
- Google Earth (2021). Figura 2. Mapas Topograficos.
- INEGI, (2001). "Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán".
- INEGI, (2010). "Geología de la Península de Yucatán".
- Pacheco, J., Alonzo, L., (2003). "Caracterización del material calizo de la formación Carrillo Puerto".
- Prado, S., (2008). "Estrategia preliminar para la aplicación de la política de gestión del agua por cuenca en la Región XII, Península de Yucatán".
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos), (1988), "Sinopsis geohidrológica del Estado de Yucatán" Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- SMN, (2020). "Boletín de la DT Cristóbal".

Sistemas y Geometrías de Techos para Mitigar la Formación de Islas de Calor Urbano

**Yarandy Georgina Padilla Manrique e
Inocente Bojórquez Báez**

1. Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo

Correos electrónicos: yarandypadilla@gmail.com
inocentebojorquez@gmail.com

Resumen

El análisis de las interacciones entre las temperaturas superficiales y las condiciones atmosféricas establecen los criterios para la planeación urbana con carácter sustentable. Lo que se pretende en este ejercicio, es compartir un criterio basado en tres etapas para el diseño de techos en edificios de bajo consumo energético como propuesta para la mitigación de la formación de Islas de Calor Urbano, de acuerdo con las recomendaciones emanadas de acuerdos, leyes y normas nacionales e internacionales. El estudio partió de la elección de los meses de mayores variaciones de temperatura utilizando imágenes satelitales Landsat 8 nivel 1 del Servicio Geológico de Estado Unidos; para la obtención de la temperatura superficial se utilizó la metodología de Avdan y Jovanoska; para la obtención de temperatura se empleó el software ArcMap 10.3. Adicional del cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) se complementó con el cálculo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) calculados utilizando las bandas NIR Near InfraRed (infrarrojo cercano) y SWIR Short Wavelength Infrared (infrarrojo corto) La segunda etapa se dirigió al comportamiento sinusoidal de dos tipos de techos característicos de las viviendas ubicadas en la zona de estudio; el procedimiento fue de acuerdo con la norma ASTM C 1146; las imágenes infrarrojas que sirvieron para el análisis sinusoidal se obtuvieron con una cámara fototérmica de 20 mm. El tercer criterio fue realizado bajo el método analítico sobre las ganancias térmicas en geometrías de los dos tipos de techos de la segunda etapa, los cálculos se realizaron con la ayuda del software VIVE-2. Los resultados mostraron las posibilidades de diseñar viviendas de bajo consumo energético como una de las alternativas para mitigar la generación de Islas de Calor Urbano.

Palabras clave: Islas de Calor Urbano, vivienda de bajo consumo energético, imágenes satelitales, imágenes infrarrojas, NDVI, NDBI.

Abstract

The analysis around interactions between surface temperatures and atmospheric conditions establishes the criterion for sustainable urban planning. What is intended in this exercise is to share a criterion based on three stages for roof designing in low-energy buildings as a proposal for mitigating Urban Heat Island.

According with those recommendations emanating from Agreements, National and International Laws and Regulations. The study began by choosing the months with the greatest temperature variations using Landsat 8 level 1 satellite images from the United States Geological Survey; to obtain the Surface temperature, the Advan and Jovanoska methodology was used; ArcMap 10.3 software was used to obtain temperature. Additional calculation of the NDVI, was complemented with calculations of the NDWI and NDBI. The second stage addressed the sinusoidal behavior of two types of roofs characteristic of the homes located in the study area; The procedure was in accordance with ASTM C 1146; The infrared images used for the sinusoidal analysis were obtained with a 20 mm photo-thermal camera. The third criterion was carried out under the analytical method on the thermal gains in geometries of the two types of roofs of the second stage, the calculations were carried out with the help of the VIVE-2 software. The results showed the possibilities of designing low energy consumption homes as one of the alternatives to mitigate the generation of Urban Heat Islands.

Keywords: Urban Heat Islands, Low energy Consumption Housing, Satellite images, Infrared images, NDBI, NDVI.

Introducción

En el estudio de la generación de las Islas de Calor Urbano (ICU) los múltiples trabajos de investigación muestran en su mayoría, que la causa principal son las modificaciones del entorno que conducen a la pérdida de la masa vegetal debido a las acciones antropogénicas, que, aunque en ocasiones pueden ser positivas para el desarrollo económico y social, efecto contrario puede darse en lo ambiental. Para tratar de encontrar los equilibrios necesarios que conduzcan a la formación de comunidades más sustentables, es conveniente escudriñar las interrelaciones entre los múltiples factores que intervienen. Una de estas interrelaciones tratada a nivel micro, es la relativa a la interacción entre el edificio y las condiciones atmosféricas, destacando en ésta, el sistema de techos, en especial los que conforman las azoteas, ya que es a través de este elemento de la envolvente donde ocurren las transferencias de calor desde la superficie hacia el interior y las reflectancias desde la superficie hacia la atmósfera.

La importancia de estos estudios reside en encontrar soluciones para prevenir impactos negativos en la salud humana por un lado y, mitigar la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por el otro; mediante estos criterios se pretende lograr condiciones de confort en los espacios interiores y condiciones de habitabilidad en los exteriores con mínimos consumos de energía, rompiendo el círculo vicioso de consumo-emisión-consumo causante de la formación de bucles infinitos con desenlaces no deseados.

Bajo esta perspectiva, en este trabajo se comparten algunas de las experiencias alrededor de investigaciones sobre los ICU con el propósito de identificar los aspectos más relevantes que causan la formación de este fenómeno y conocer las recomendaciones para su mitigación.

Estudios realizados por (Swamy, *et al.*, 2017) en un ambiente tropical húmedo, trabajando con las características de la temperatura ambiente asociadas con los cambios de uso del suelo en diferentes microambientes, encontró que velocidades de viento entre 2 y 5 m/seg incrementan la intensidad de las islas de calor.

Manzanilla comenta que las Islas de Calor Urbanas (ICU) influyen no solamente en la calidad de vida de los habitantes, sino que también son parte importante de los impactos negativos en las biodiversidades locales (Manzanilla-Quiñones, 2022). En el mismo tenor, Ballinas, Ballinas y Barradas (2016) en estudios hechos en la Ciudad de México también se refieren a los problemas de salud generados por la falta de confort térmico debido a los efectos de las ICU, sugiriendo, por consiguiente, aumentar la cobertura de copas de árboles, recomendación que coincide con los planteamientos de Barradas (2013) que plantea como solución la colocación de arreglos de vegetación arbórea en puntos estratégicos de la población en estudio, dichos arreglos, sugiere que sean de preferencia con especies nativas; en sus estudios en la Ciudad de México, trabajando con dos especies, el hule (*Ficus elástica*) y el trueno (*Ligustrum lucidum*) encontró que a través de sus procesos de transpiración pueden bajar la temperatura 7°C con respecto a la superficie de rodamiento.

Las recomendaciones de Salas y Herrera (2017) que estudiaron el impacto de las áreas verdes como sistemas de control en una población de clima seco con temperaturas extremas (Afw1, de acuerdo con Köppen) no se alejan mucho de los criterios anteriores. El trabajo desarrollado por el equipo de Alamilla (Alamilla *et al.*, 2009) sobre el costo-beneficio de la presencia de vegetación en una vivienda de interés social, encontró que la presencia del laurel de la india (*Ficus benjamina*) reducía 18% el consumo de energía.

Sin embargo, el equipo liderado por Correa (Correa *et al.*, 2003) trabajando en el mismo microclima de los autores que preceden, se refieren a los pavimentos como los generadores de ICU; indagando con distintos tipos de pavimento concluyen que el incremento de la temperatura superficial se debe a la influencia de elevados niveles de radiación y a la absorptividad de la superficie.

Por su parte, Candanedo no sólo se refiere a los pavimentos, comenta que son varios los móviles que generan las islas de calor, entre ellas las acciones antropogénicas que conllevan altos consumos de energía, de igual forma las geometrías de los edificios muchas veces causantes de la formación de sombras de viento y el diseño urbano alejado de la integración con las variables ambientales (Candanedo y Villarreal, 2020).

El microclima extremoso de períodos cálidos prolongados de una ciudad ubicada en el noroeste de México llevó a Mercado y Marincic (2017) a estudiar los factores que intervienen en la formación de Islas de Calor Urbano, con el propósito de establecer estrategias de mitigación para lograr condiciones de habitabilidad, además de un ambiente confortable tanto en el exterior como en los espacios interiores y reducir con ello los altos consumos de energía. Encontraron que el diseño urbano

con superficies de rodamiento automotriz y edificaciones sin estrategias ambientales, la falta de equilibrio entre densidades de población y áreas verdes y la ausencia de políticas públicas sobre la temática, son las principales causas.

Si bien, los estudios sobre las ICU suceden normalmente en climas cálidos, también este fenómeno se forma en climas mediterráneos cuyas oscilaciones de temperatura van de valores menores de los 10° y no mayores de 25° C, como es el caso de la ciudad de Rancagua en Chile, donde el grupo de Sarricolea (Sarricolea *et al.*, 2008) concluyó que la ausencia de parques urbanos y la poca significancia entre temperatura y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) son las principales causas de la formación de islas de calor. En estudios realizados en algunas ciudades europeas de Grecia y España principalmente, el denominador común para la formación de este fenómeno es la densidad de población y la ausencia de áreas verdes, justamente es en los cascos históricos durante el período nocturno donde normalmente ocurren, generando ausencia de confort térmico en los espacios interiores lo que provoca una mayor demanda de energía por el uso de equipos de aire acondicionado aumentando con ello la emisión de Gases de Efecto Invernadero; las zonas industriales juegan igualmente un papel preponderante debido a la contaminación atmosférica de sus procesos (Moreno y Serra, 2016).

Los diversos estudios alrededor de las islas de calor urbano coinciden en que la implementación de cambios de estrategias sobre diseño y planificación urbana con enfoque de habitabilidad sería una de las respuestas para mitigar este fenómeno, causante de la falta de confort térmico tanto en espacios exteriores e interiores donde el uso de medios mecánicos para moderar esta inconveniencia induce a la emisión de Gases de Efecto Invernadero debido a los altos consumos de energía. Sin embargo, la gran traba para superar la barrera de la inacción ante esta preocupante situación es la falta de vinculación entre los sectores académico, empresarial y de gobierno. Este último, ha instrumentado acciones concurrentes a garantizar un medio ambiente sano, donde pueda darse un desarrollo económico sustentable y de bajas emisiones de carbono (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2012). No obstante, se carece de la acción conjunta para regular y garantizar la implementación de edificaciones sustentables (Comisión Nacional de Vivienda, 2017) por lo que, son escasos los productos bajo estos criterios, las hipótesis conducen a la prevalencia del interés lucrativo sobre el interés sustentable.

Este trabajo se enfocó, por consiguiente, a seguir desarrollando metodologías para el diseño de edificaciones de baja emisión de carbono basado en casos reales. A partir de la obtención del calor superficial urbano mediante imágenes satelitales en una población ubicada en el Caribe Mexicano, el estudio se siguió con el análisis de las interacciones entre las condiciones atmosféricas y el calor superficial de dos de los sistemas de techos empleados en la zona de estudio, mediante imágenes infrarrojas y por último, mediante el método empírico se identificaron las geometrías y orientaciones adecuadas para coadyuvar con la mitigación de la carga de calor urbano.

Los resultados expusieron que la aplicación de estos criterios en proyectos ejecutivos de edificios, independientemente de su tipo, son parte de las respuestas para regular las emisiones de GEI y, reducir con ello, los efectos nocivos en la población y los ecosistemas, como se propone en el Art. 2º. de la Ley General contra el Cambio Climático.¹

Metodología

Área de estudio

La ciudad de Chetumal, como se muestra en la figura 1, se encuentra ubicada en el estado de Quintana Roo en el sureste de México a una altitud promedio de 10 metros sobre el nivel del mar y a orillas de la Bahía de Chetumal. Tiene una población de 169,028 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) y un crecimiento poblacional de 11.8% con respecto al 2010.

El clima de Chetumal está clasificado como Cálido subhúmedo con lluvias en verano, la temperatura promedio de la ciudad es 27.3°, siendo el periodo de mayores temperaturas el comprendido entre abril y septiembre; en cuanto la precipitación el promedio es de 92 mm siendo junio y octubre los meses con mayor precipitación (Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2022).

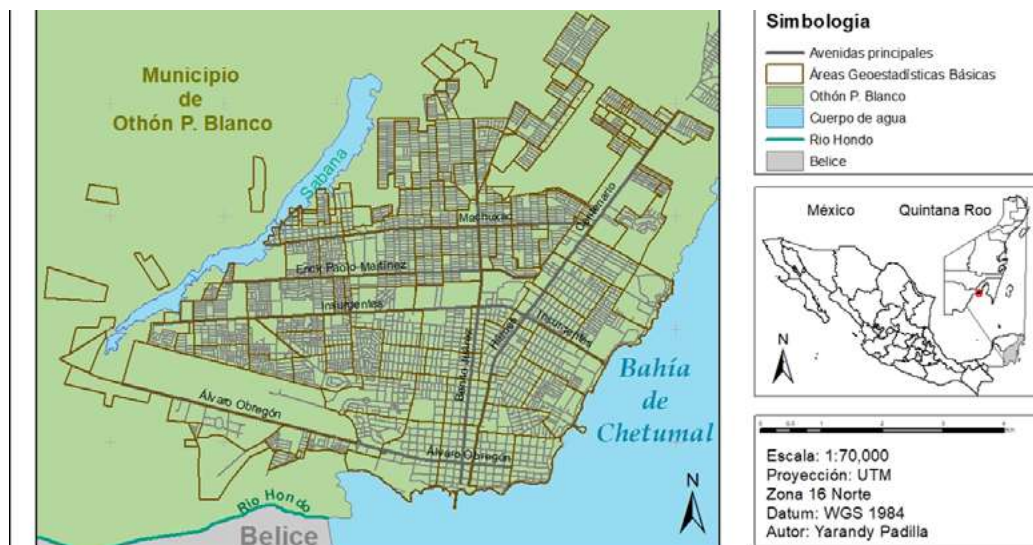


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Fuente. (Padilla, 2019).

Se determinó el comportamiento espacio temporal durante el 2018 del calor superficial urbano de Chetumal utilizando imágenes satelitales de enero, mayo y julio. Como primer paso, se realizó la elección de los meses con mayor cambio con respecto a la

1. *Op, cit*

temperatura promedio, por ello se consultaron las bases de datos climatológicos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en específico las Normales Climatológicas por Estado en este caso Quintana Roo, se seleccionaron las Estaciones Meteorológicas Automáticas correspondientes a Chetumal, siendo cuatro en total. Se calculó el promedio de las cuatro estaciones para temperatura promedio, temperatura máxima promedio y temperatura mínima promedio, con estos datos se construyó un gráfico de barras (figura 2) de la distribución de normales climáticas del periodo 1981 – 2010 para identificar cambios significativos de la temperatura durante el año. Con estos datos se eligieron los meses de enero, mayo y julio como clave.

Con los meses definidos se obtuvieron las imágenes satelitales del Servicio Geológico de Estado Unidos (USGS) para el área de estudio (path 019, row 047), descargando aquellas donde el área de estudio no tuviera nubosidad, obteniendo en total tres imágenes Landsat 8 nivel 1, de las fechas 09 de enero 2018, 17 de mayo 2018, 20 de julio 2018. Se utilizó la metodología definida por Avdan y Jovanoska (2016) para el procesamiento de la obtención de la temperatura superficial, los cálculos se realizaron empleando el software ArcMap 10.3.

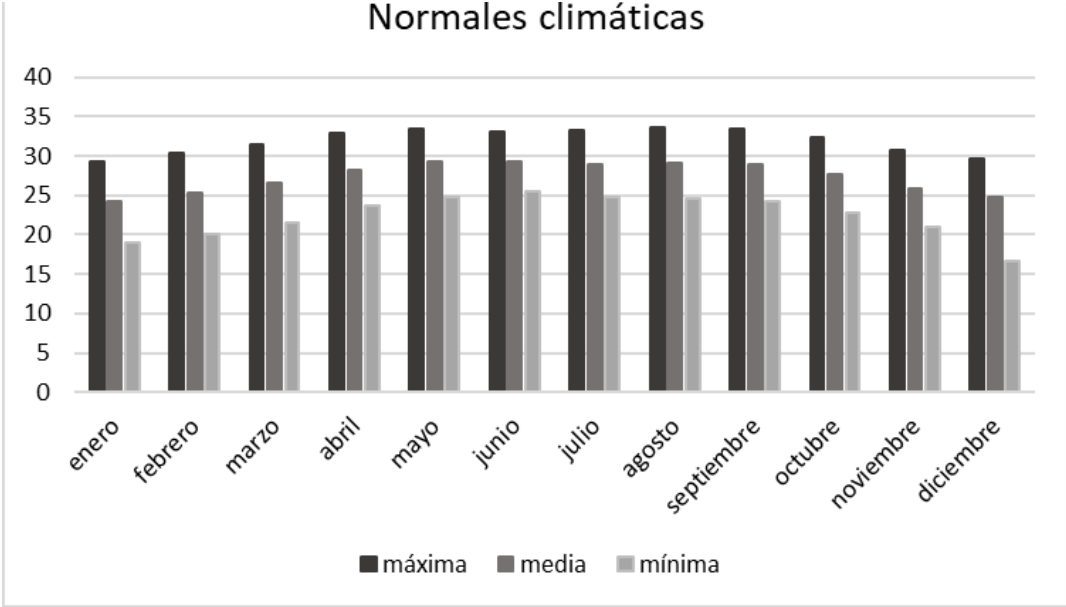


Figura 2. Distribución de normales mensuales climáticas del periodo 1981 – 2010.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional.

Los datos resultantes de temperatura se utilizaron para determinar las anomalías térmicas, calculándolas con los datos de temperatura media y desviación estándar de cada imagen procesada, el proceso constó de restarle a la temperatura promedio la imagen de análisis y el resultado dividirlo sobre la desviación estándar como en la siguiente fórmula:

$$\frac{\bar{x} - im}{\sigma}$$

Donde:

$\bar{x}$ Es la temperatura promedio

σ Es la desviación estándar

im Es la imagen analizada

Los resultados obtenidos pueden ser negativos o positivos, un dato negativo arroja información de áreas de mayor acumulación térmica y probabilidad de formación de isla de calor, los datos positivos representan áreas de temperatura menor.

Los datos calculados de temperaturas se vectorizaron para categorizar las intensidades, obtenidas a través de una resta de la temperatura menor a la temperatura mínima urbana, obteniendo un rango de -2°C a 7°C.

Adicional del cálculo de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) dentro de la metodología de Avdan y Jovanoska (2016) se complementó con el cálculo del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI) calculados utilizando las bandas NIR Near InfraRed (infrarrojo cercano) y SWIR Short Wavelength Infrared (infrarrojo corto) por medio las ecuaciones:

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \frac{Banda\ 6 - Banda\ 5}{Banda\ 6 + Banda\ 5}$$

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \frac{Banda\ 5 - Banda\ 6}{Banda\ 5 + Banda\ 6}$$

Donde

La banda 5 es Infrarrojo cercano con longitud de onda de 0.85 – 0.88 micrómetros.

La banda 6 es SWIR 1 con longitud de onda de 1.57 – 1.65 micrómetros.

Utilizando las Áreas Geoestadísticas Básicas de INEGI (2010) se extrajo la estadística descriptiva de los índices NDVI, NDWI y NDBI y temperatura empleando la herramienta “zonal statics” de Arcmap. Finalmente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson a los datos de promedio obtenidos anteriormente para determinar la relación entre variables.

Lo anterior, define que las temperaturas de Chetumal tienen un comportamiento espacio temporal persistente durante los meses analizados, pese a que el calor se incrementa durante algunos meses los patrones prevalecen determinados por elementos urbanos puntuales como se verá a continuación.

Comparación urbano – rural

De la tabla 1 describiendo los datos por meses, enero es el mes que presentó las menores temperaturas, los puntos de temperatura máxima dentro de la ciudad registraron 26.5°C mientras que en Calderitas la temperatura máxima fue de 24.2°C teniendo una diferencia de 2.3°C. Las temperaturas mínimas fueron similares para Chetumal y Calderitas con 20.9°C y 21°C respectivamente teniendo una leve diferencia de 0.1°C, en promedio la temperatura de Chetumal para enero es de 23.5°C, 0.9°C por encima de los 22.7°C promedio de Calderitas, la oscilación entre los sitios con mayores temperaturas y los de menor temperatura es de 5.9°C para Chetumal y de 3.2°C para Calderitas, teniendo una diferencia de oscilación entre estos de 2.7°C siendo la mínima diferencia oscilatoria en este mes. En general enero es el mes con las menores diferencias entre las diferentes temperaturas y promedios para Chetumal y Calderitas.

Mayo por su parte es el mes donde más se acrecientan las diferencias, en cuanto a las temperaturas máximas la diferencia entre estos dos lugares es de 3.9°C siendo Chetumal más cálido con 29.8°C sobre los 25.9°C de Calderitas, en el caso de las temperaturas mínimas se observa la mayor diferencia entre estas temperaturas con 1.8°C, sin embargo, los sitios con menores temperaturas se ubican en Chetumal teniendo estos 20.4°C en comparación con los 22.2°C en Calderitas, cabe resaltar, que la menor temperatura urbana también se observa durante este mes y no durante enero que corresponde al mes más frío. En temperatura promedio la diferencia es de 1.6°C, Chetumal teniendo una temperatura promedio de 26.1°C y Calderitas con 24.5°C, la oscilación térmica de Chetumal en mayo tiene la mayor amplitud de los periodos analizados, con una diferencia entre temperaturas máximas y mínimas es de 9.4°C, comparando la oscilación de 3.7°C de Calderitas la disimilitud es de 5.7°C siendo la mayor de los tres meses.

En julio se registraron las temperaturas máximas más altas de los tres meses, algunos sitios de Chetumal registraron 31.6°C y en Calderitas 28.3°C con una diferencia de 3.3°C, la temperatura mínima es muy cercana entre estos dos sitios con una leve diferencia de 0.2°C registrando las temperaturas más bajas en Chetumal con 23.6°C y poco más elevadas en Calderitas con 23.8°C. En promedio la diferencia entre las temperaturas es de 1.2°C, Chetumal con el promedio más alto de 28.1°C y Calderitas con 26.9°C, siendo estos los promedios más elevados de los tres meses y con una diferencia entre ellos de 1.2°C. De la diferencia entre temperaturas máximas y mínimas Chetumal presenta una oscilación de 8°C y Calderitas de 4.5°C presentando la mayor oscilación de los tres meses analizados, la diferencia entre ambas es de 3.5°C.

Comparando la temperatura de Chetumal como ambiente urbano contra Calderitas la comunidad rural con mayor proximidad, se observa que los tres momentos analizados tienen un comportamiento distinto. En cuanto a las temperaturas máximas Chetumal es más cálido que Calderitas en los tres meses en promedio 3.2°C, sin embargo, en temperaturas mínimas Chetumal presenta las menores temperaturas en promedio 0.7°C menos que Calderitas, en datos promedio el ambiente urbano es más

cálido que el ambiente rural con una diferencia promedio de 1.2°C, también se observa que la mayor oscilación entre temperatura mínima y máxima se da en el ambiente urbano ya que la diferencia entre oscilaciones en promedio es de 3.9°C.

Tabla 1. Variación y comparación térmica de Chetumal y Calderitas.

Mes	Enero		Mayo		Julio		Diferencia promedio
Lugar	Chetumal	Calderitas	Chetumal	Calderitas	Chetumal	Calderitas	
Temperatura máxima	26.5°C	24.2°C	29.8°C	25.9°C	31.6°C	28.3°C	
Diferencia	2.3° C		3.9° C		3.3° C		3.2° C
Temperatura mínima	20.9°C	21°C	20.4°C	22.2°C	23.6°C	23.8°C	
Diferencia	0.1° C		1.8° C		0.2° C		0.7°C
Promedio	23.5°C	22.7°C	26.1°C	24.5°C	28.1°C	26.9°C	
Diferencia	0.9° C		1.6°C		1.2°C		1.2°C
Diferencia Máx. – Mín.	5.9°C	3.2°C	9.4°C	3.7°C	8°C	4.5°C	
Diferencia	2.7°C		5.7°C		3.5°C		3.9°C

Fuente: (Padilla, 2019).

Comportamiento espacio – temporal

El calor en Chetumal tiene una distribución de almacenamiento en la parte interna de la Ciudad mostrando un descenso a la periferia, esta distribución se mantiene durante los tres meses (figura 3), las mayores concentraciones se distribuyen de la parte central hacia la parte inferior de la ciudad mientras que las mínimas se localizan en los límites de Chetumal. Enero es el mes con las menores temperaturas con una máxima 26°C y una mínima 20°C y julio alcanza las temperaturas mayores con una máxima de 31°C y mínima de 23°C, en ambos meses las temperaturas máximas presentan un patrón similar de dispersión, en mayo donde las temperaturas oscilan entre los 20°C y 29°C estos puntos de máximas se extienden sobre una mayor superficie.

Intensidades térmicas

Este comportamiento espacial de las mayores temperaturas se reafirma con la figura 4 de intensidades donde las intensidades máximas durante enero se observan como zonas aisladas entre sí manteniéndose casi constantes con esa distribución durante

julio, la diferencia más notoria entre ambos meses es el incremento en la intensidad, aumentando de uno a tres grados. Durante mayo se observa la ausencia de ciertos máximos siendo el localizado sureste de la ciudad el más evidente, pero se destaca el incremento en la extensión de la mancha ubicada al oeste de la ciudad y cuyo incremento en la superficie logra conectar diferentes zonas creando el área de mayor extensión de temperaturas máximas.

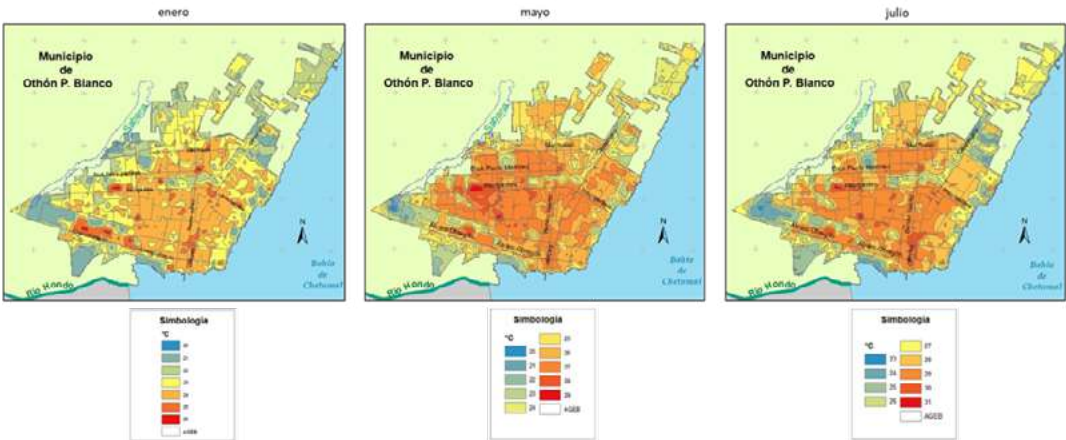


Figura 3. Comportamiento espacio temporal del calor en Chetumal en los meses de enero, mayo y julio.

Fuente: (Padilla, 2019).

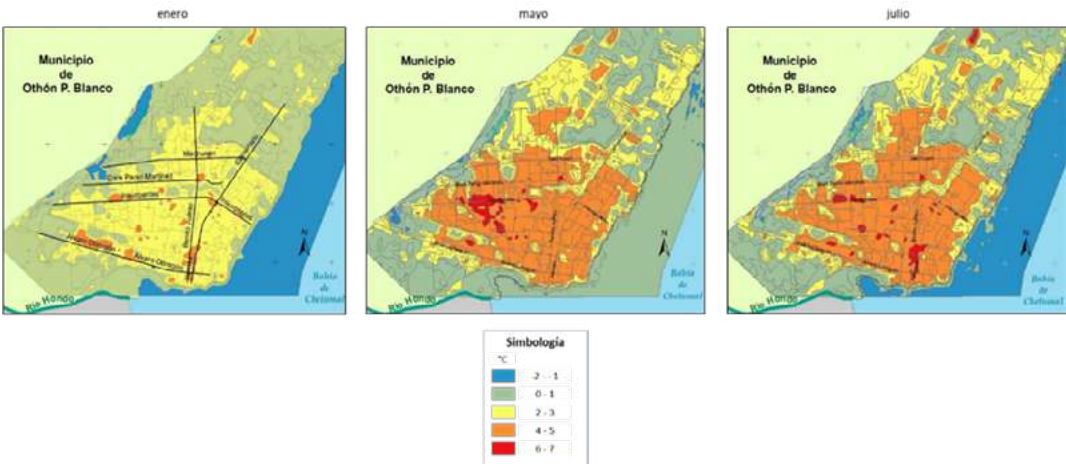


Figura 4. Intensidades térmicas de Chetumal en los meses de enero, mayo y julio.

Fuente: (Padilla, 2019).

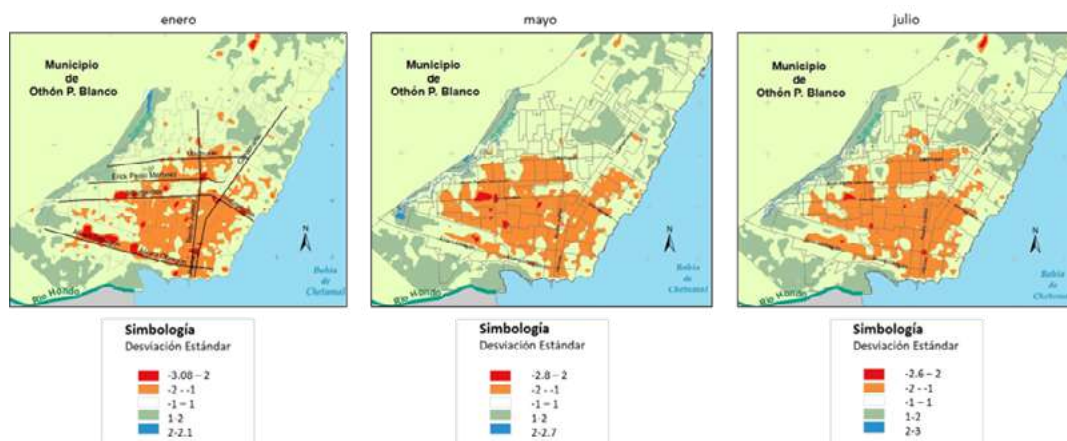


Figura 5. Anomalías térmicas de Chetumal en los meses de enero, mayo y julio.

Fuente: (Padilla, 2019).

Anomalías térmicas

Por su parte, las anomalías térmicas enfatizan las áreas con mayor probabilidad de convertirse en una isla de calor, en la figura 5 se observa el patrón antes descrito, mostrando la acumulación del calor predominantemente al interior de la ciudad y con puntos máximos aislados pero constantes que aumentan o disminuyen su superficie según el mes. La acumulación del calor se mantiene y su extensión incrementa como se observa de enero a mayo, en enero el patrón representado en color naranja se distribuye de forma consistente en la mitad inferior de la ciudad, mientras que en la parte superior su comportamiento tiene mayor fragmentación y dispersión, durante los meses subsecuentes la anomalía dispersa en la parte superior de la ciudad se une y conecta todas las zonas fragmentadas y formando un área extensa sólida con bordes bien delimitados. También en esta dispersión de anomalías se observan anomalías positivas que corresponden a la formación de islas frías, el caso más evidente es durante el mes de julio, situado al noroeste se ubica un área con anomalías de valor de 1-2 que separa en dos la distribución superior de anomalías negativas.

Sobre la superficie los elementos donde se presentan las temperaturas, intensidades y anomalías máximas tienen la característica de ser lugares con predominancia de concreto, ausencia de vegetación y en algunos casos con sistemas de calefacción de gran volumen. En mayo se observa un incremento superficial del calor, el área que permite la conexión entre los puntos máximos corresponde a un uso de suelo que en su mayoría es casa habitación, por lo que se resalta que la predominancia que incide en la absorción y acumulación del calor podría estar explicada por los techos de las viviendas facilitando la formación del corredor generado. Los puntos al interior de la ciudad que presentan las menores temperaturas están vinculados con masas de vegetación que pueden cubrir una extensión de 100 x 100 metros.

Índices

Dentro de las ciudades existen elementos que intervienen de mayor o menor forma sobre la acumulación del calor, en Chetumal la correlación entre temperatura y los índices de vegetación, edificación y humedad demuestran que la relación entre temperatura y vegetación prevalece sobre la humedad en el ambiente o el porcentaje de edificación. Los resultados sintetizados (tabla 2) se analizaron utilizando como unidad las Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEB) de Chetumal, promediando los datos de temperatura e índices para cada AGEB, se encontró que las AGEB de mayor temperatura tienen un menor valor de NDVI y de NDWI y un mayor valor de NDBI, siendo lo contrario para las AGEB de menor temperatura con un mayor valor de NDVI y de NDWI y un valor menor de NDBI, aunque tanto el NDVI como NDWI intervienen positivamente en la disminución de la temperatura como el NDBI en el aumento de la misma, los valor de NDVI relacionados con la temperatura son mayores, enfatizando que la ausencia o presencia de la vegetación actúa como elemento determinante para la acumulación.

Tabla 2. Resultados de la correlación de Pearson de temperatura con el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) y el Índice de diferencia Normalizada Edificada (NDBI).

Mes	Temperatura/NDVI	Temperatura /NDBI	Temperatura / NDWI
enero	-0.61	0.55	-0.55
mayo	-0.64	0.61	-0.61
julio	-0.80	0.76	-0.76

Fuente: Elaboración propia.

Sobre el comportamiento sinusoidal de los techos

Estudios previos a los realizados bajo el criterio anterior coincidieron con lo expresado en las Anomalías; por lo que, a partir del eclecticismo de los estilos arquitectónicos prevalecientes en las AGEB donde el índice NDBI es mayor que los NDVI y NDWI, este estudio centrado en las interacciones entre los sistemas de techos y las variables climatológicas tomó como referente, aquellos usados en las viviendas de interés social, cuyos sistemas constructivos, con leves diferencias en sus diseños, son semejantes a los empleados en propuestas para grupos de mayores niveles socioeconómicos, como se aprecia en la figura 6; cabe destacar que este elemento de la envolvente es el de mayor conductancia térmica y que de acuerdo a Oke (Oke, 2002) es donde se presentan temperaturas diferentes a las obtenidas en el suelo debido a la interacción entre la atmósfera y la superficie del edificio.

Los trabajos realizados por Bojórquez (Bojórquez, *et al.*, 2010) sobre las transferencias de calor y de temperatura, en dos sistemas de techo, de acuerdo a la norma ASTM C 1146 (American Society for Testing and Materials, 1995) permitieron observar el

comportamiento sinusoidal debido a la interacción entre las condiciones atmosféricas y las superficies de las caras externas e internas de un sistema homogéneo a base de hormigón armado y otro no homogéneo a base de viguetas y bovedilla, en ambos, las capas externas consistieron en un impermeabilizante local a base de cal, y las internas en un mortero compuesto con cal, cemento Portland y polvo de piedra caliza.

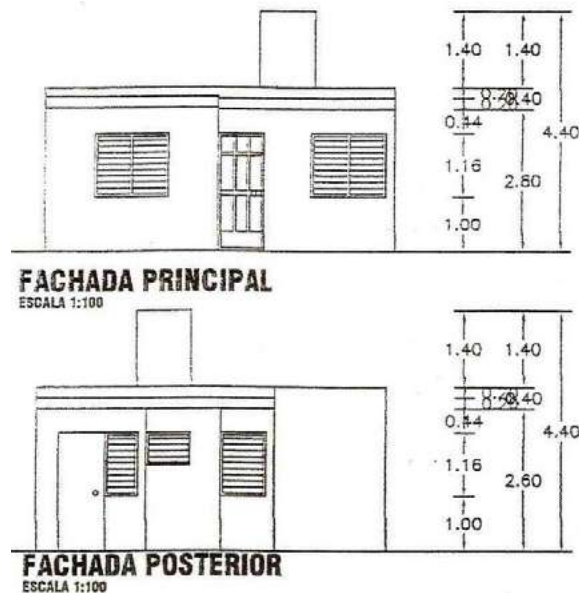


Figura 6. Prototipo de vivienda ubicada en la zona de estudio.

Fuente: (Díaz, 2010).

Los ensayos se realizaron durante 24 horas de uno de los días del mes de mayo que a pesar de no tener el valor más alto de la relación temperatura/NDBI, sí es, de acuerdo con las normales climatológicas de la zona, uno de los meses que presenta las temperaturas más elevadas del año con precipitaciones escasas; se apoyó para ello, en las imágenes infrarrojas obtenidas mediante una cámara fototérmica de 20 mm, con rango de temperatura de 20 °C a 100 °C y sensibilidad térmica de ≤ 0.1 °C a 30 °C (100 mK). En la figura 7 se muestra el comportamiento del sistema de techo plano a base de vigueta y bovedilla, cuya temperatura superficial máxima, obtenida a las 14:00 horas, alcanzó los 54.9 °C; mientras que en la figura 8 se observa lo propio en el sistema homogéneo, cuya temperatura de 65.6 °C se obtuvo a las 13:00 horas. La radiación total calculada con datos de la Comisión Nacional del Agua, a las 13:00 horas fue de 729.22 (W/m²) mientras que a las 14:00 fue de 659.32 (W/m²), las velocidades mínima y máxima del viento en el exterior se obtuvieron mediante un anemómetro digital, con medidor de flujo de aire de 0 a 45 m/s, los resultados fueron 0.1 y de 1.3 m/s respectivamente.

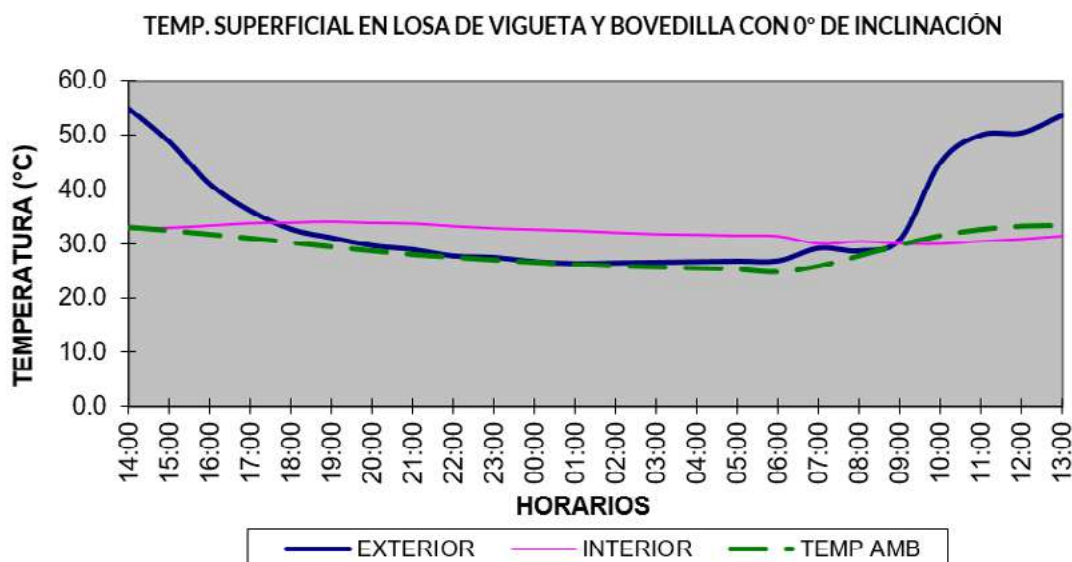


Figura 7. Temperaturas superficiales en un sistema a base de vigueta y bovedilla.

Fuente: Elaboración propia, 2010.

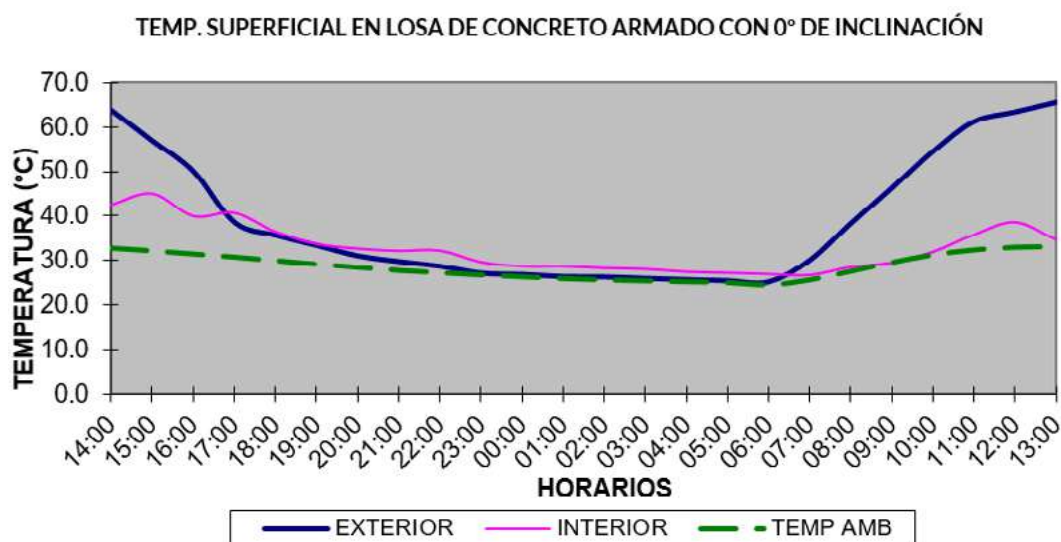


Figura 8. Temperaturas superficiales en un sistema a base de hormigón armado.

Fuente: Elaboración propia, 2010.

Sobre geometrías de techos

Estos resultados llevaron a Díaz (2010) a analizar los comportamientos térmicos del sistema no homogéneo con las variantes de cuatro geometrías y ocho orientaciones mediante el programa VIVE-2 que considera la energía radiante para cada superficie y los coeficientes de convección entre el aire y las superficies, además de la velocidad del aire; para este trabajo sólo se exponen algunos de los resultados, a manera de

ejemplo, de lo que significa la influencia de los elementos de la envolvente, en sus diferentes variantes, y las condiciones atmosféricas. Lo que revela la tabla 3 son los efectos que producen, a las 14:00 horas con orientación NE, cuatro tipos de geometrías de techos; mientras que en la figura 9 no sólo se refiere al techo *per se*, también incluye las correspondientes a los muros y a las que se obtienen mediante la interacción entre muros y techos, durante el período comprendido entre las 6:00 y las 18:00 horas.

Tabla 3. Ganancias térmicas en techos con cuatro diferentes ángulos de inclinación orientados al NW.

Ángulo de inclinación de los techos	Superficie de la vivienda	GANANCIAS		Orientación	Hora
		Máxima (Watts)	Por m^2 de la superficie de la vivienda		
0°	32	2713.17	84.78	NOROESTE	14:00
10°	32	2234.47	69.82	NOROESTE	14:00
20°	32	2364.92	73.90	NOROESTE	14:00
30°	32	2513.60	78.55	NOROESTE	14:00

Fuente: Elaboración propia.

La figura 9 presenta las ganancias térmicas obtenidas en tres criterios de cálculo: losa-muros, sólo muros y sólo losas en un sistema de techos inclinado 10 °C con respecto a la horizontal y orientado al sur.

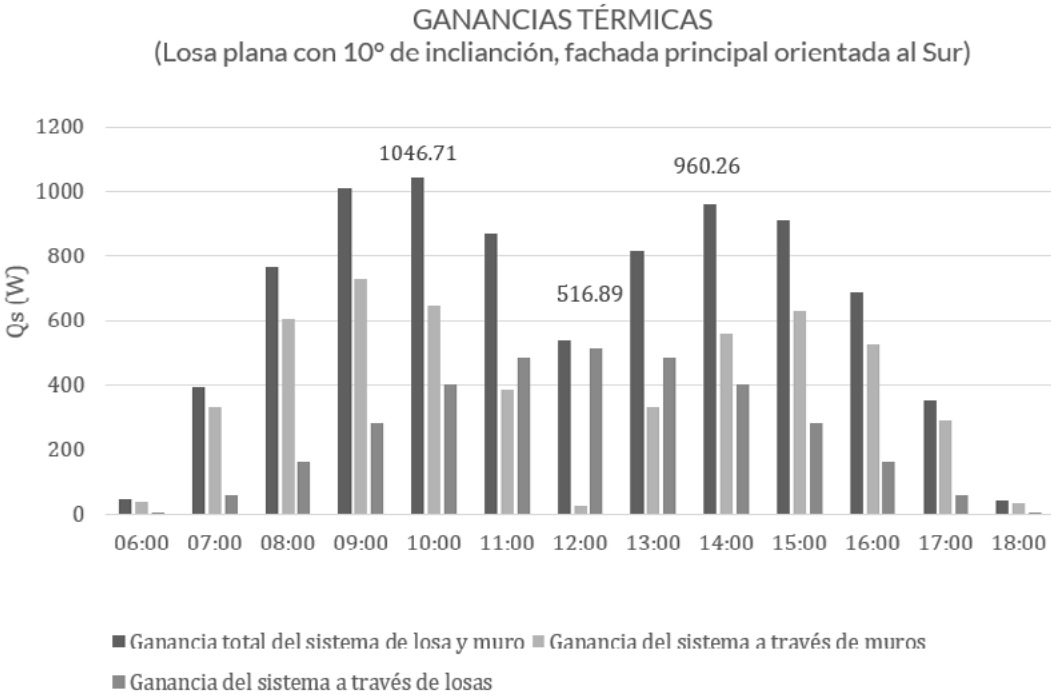


Figura 9. Ganancias térmicas en muros y techos con 10° de inclinación orientados al sur.

Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Conocer la dinámica térmica de las ciudades es el primer paso para identificar las áreas de oportunidad en la intervención de construcción de espacios habitables y adaptables al incremento de la temperatura global. Chetumal ciudad de poco más de 150,000 habitantes muestra que la acumulación térmica no es propia de grandes metrópolis, sino como describe Oke (1973) es el tamaño de la ciudad y de su población lo que determina la intensidad del fenómeno. Chetumal considerado como ambiente urbano en comparación con Calderitas como ambiente rural tienen una diferencia promedio de 1.2°C con sus variaciones en las temperaturas mínimas y máximas, concordando con la diferencia de temperatura esperada entre el ambiente rural y urbano (Nuruzzaman, 2015; Oke, 2011; Taha, 1997).

La acumulación del calor dentro de la Chetumal puede explicarse a través de diferentes factores como lo son los elementos artificiales en el uso de suelo (Onishi *et al.*, 2010), la presencia de vegetación (Jenerette *et al.*, 2007), la influencia de los techos (Zhao *et al.*, 2015), sin embargo, las intensidades y magnitudes que se presentan en la ciudad y su variación en el comportamiento hacen necesario comprender a detalle la aportación de estos elementos (Kim & Brown, 2021).

En cuanto la relación de la temperatura con los índices, el efecto que la vegetación tiene sobre el comportamiento de la temperatura es algo ya analizado (Tzavali *et al.*, 2015), en particular en Chetumal el elemento con mayor influencia sobre la temperatura es la vegetación, sin embargo, cada ciudad puede tener un elemento influyente diferente, Yuan & Bauer (2007) identificaron que la temperatura en su zona de estudio está más relacionada con la edificación que con la vegetación, esto resalta la importancia de analizar localmente los elementos que inciden en la acumulación del calor.

Lo que sucede en Chetumal no es muy diferente a lo expresado por estos últimos autores; por lo tanto, los resultados del estudio sobre el calor superficial urbano de Chetumal utilizando imágenes satelitales permitieron comprobar lo planteado en los apartados II y III de esta metodología, así mismo se pudo observar que las condiciones socioeconómicas, en este caso, no son condicionantes para la generación de ICU

Conclusiones

Las ciudades pequeñas como Chetumal se encuentran en un momento oportuno para determinar los factores que intervienen en la acumulación del calor, actualmente ante el incremento de la temperatura global resulta importante conocer el comportamiento térmico de las ciudades con el fin de crear escenarios resilientes y adaptados a los efectos de cambio climático, para ello resulta necesario conocer a nivel local

cuáles son los elementos que participan en la retención del calor con el fin de adoptar estrategias de mitigación aptas para disminuir la temperatura y con ello mejorar la habitabilidad.

Aunque las corrientes de investigación alrededor de las islas de calor reiteran la implementación de medidas de mitigación como la integración de vegetación al perfil urbano es indispensable conocer las características térmicas de la ciudad con el fin de identificar las zonas más óptimas para esto, también es necesario evaluar si estas medidas son las ideales dadas las características urbanas, en el caso de Chetumal que presenta un área que puede considerarse una isla fría se observa un área cubierta de vegetación de aproximadamente 10,000 m³, esto es importante porque permite poner sobre la mesa el impacto real de la vegetación en la temperatura urbana, ya que en la observación satelital la influencia que esta masa vegetal tiene solo impacta el área próxima por lo que es necesario conocer la temperatura del aire circundante con el fin de comprender si existe o no influencia positiva más allá del análisis satelital, esto da pie a utilizar casos locales como laboratorios urbanos para hacer propuestas dentro de la planeación.

Esta investigación solo es un paso exploratorio para identificar el comportamiento de la temperatura de Chetumal de forma puntual, sin embargo, aún quedan elementos climáticos por analizar que puedan complementar la investigación y aportar en el conocimiento del clima urbano para incidir en la toma de decisiones dentro de la política pública.

Referencias

- Alamilla, E., Kauil, K., Sosa, O. & Tec, T., (2009). *Importancia de las áreas verdes en el fraccionamiento Caribe II: Beneficios de la presencia de vegetación*, Chetumal: Universidad de Quintana Roo.
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016)., Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 2016.
- Ballinas, M. & Barradas, V., (2016). The Urban Tree as a Tool to Mitigate the Urban Heat Island in Mexico City: A Simple Phenomenological Model. *J. Environmental Quality*, 45(1), pp. 157-166.
- Barradas, V., (2013). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos*, 1(7), pp. 1-3.
- Bojórquez, I., Castillo, S., Flores, F. & Hernández, J., (2010). Criterios para el diseño térmico de techumbres en climas cálido-húmedos a partir de materiales locales. *Palapa*, V(II), pp. 27-38.
- Candanedo, M. & Villarreal, D., (2020). Efecto de las Islas de Calor Urbano en las principales vías de la Cd. de Panamá. *RIDTEC*, 16(2), pp. 25-36.

- Correa, E., Flores, S. & Lesino, G. (2003). Isla de Calor Urbana: Efecto de los Pavimentos. Informe de Avance.. *Avances en Energía Renovables y Medio Ambiente*, 7(2), pp. 25-30.
- Díaz, H. (2010). *Ahorro de energía a través de la geometría y orientación de las techumbres*. Chetumal: Universidad de Quintana Roo.
- Jenerette, G. D., Harlan, S. L., Brazel, A., Jones, N., Larsen, L., & Stefanov, W. L. (2007). Regional relationships between surface temperature, vegetation, and human settlement in a rapidly urbanizing ecosystem. *Landscape Ecology*, 22(3), 353-365. <https://doi.org/10.1007/s10980-006-9032-z>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389.
- Manzanilla-Quñones, U. (2022). *Islas de calor urbanas: un fenómeno poco estudiado en México*. Morelia: CONACYT-CICY.
- Moreno, M. d. C. & Serra, J. A. (2016). El estudio de la Isla de Calor Urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. *Biblio 3W*, XXI(1179), pp. 1-32.
- Nuruzzaman, M. (2015). Urban heat island: Causes, effects and mitigation measures-a review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67-73.
- Oke, T. (2002). *Boundary Layer Climates*. Second ed. Reino Unido: Taylor & Francis e-Library.
- Oke, T. R. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (1967), 7(8), 769-779.
- Oke, T. (2002). *Boundary Layer Climates*. Second ed. Reino Unido: Taylor & Francis e-Library.
- Oke, T. R. (2011). Urban heat islands. *The Handbook of Urban Ecology*, 120-131
- Onishi, A., Cao, X., Ito, T., Shi, F., & Imura, H. (2010). Evaluating the potential for urban heat-island mitigation by greening parking lots. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(4), 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.06.002>
- Salas, M. & Herrera, L. (2017). La vegetación como sistema de control para las Islas de Calor Urbano en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(1), pp. 14-23.
- Swamy, G., Nagendra, S. & Schlink, U. (2017). Urban heat island (UHI) influence on secondary pollutant formation in a tropical humid environment. *Air Waste Manag Assoc.*, 67(10), pp. 1080-1091.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and buildings*, 25(2), 99-103.

- Tzavali, A., Paravantis, J. P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., & Stigka, E. (2015). Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(12b), 4537-4554.
- Yuan, F., & Bauer, M. E. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 106(3), 375-386. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003>
- Zhao, Q., Myint, S. W., Wentz, E. A., & Fan, C. (2015). Rooftop Surface Temperature Analysis in an Urban Residential Environment. *Remote Sensing*, 7(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/rs7091213>

Capítulo 13

Perspectiva Integral para el Desarrollo Sostenible, en Armonía con las Condiciones Climáticas, Sociales y Económicas del Hábitat Tradicional en la Región del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca

Hernán Laguna Rodríguez

San Andrés Huayápam, Oaxaca, México

Correo electrónico: lagunashernan.0001@gmail.com

Resumen

La región del Istmo de Tehuantepec oaxaqueño, sitio territorial ubicado al sureste de la República Mexicana, presenta una incesante actividad logística, con fines de desarrollo económico, donde las acciones de planeación territorial se ciernen a la consecución de la “fusión” de dos fuertes polos económicos, la hoy nombrada primer economía mundial proveniente del continente asiático (China) y la aún potencialmente economía de los EE.UU. La inacción en materia de política urbana territorial acorde con la oferta climática del sitio, habrán de traer como consecuencia, el deterioro social comunitario y la competencia económica en general, aunado a la trasgresión de cualquier política urbana implementada con fines de sostenibilidad, en la Región Istmo mexicana. El potencial energético del sitio, es inmenso, hoy esta región es la número uno en producción de energía eólica a nivel nacional, con alta presencia radiante proveniente de la energía del sol, la cual la hace propicia para integrarse al mix energético del sitio, en beneficio de cerca de 2.4 millones de habitantes. El estudio del hábitat del Corredor Interoceánico, analiza la Irradiación solar cercana a los 6 kWh/m² durante todo el año, y sus “irregularidades” climáticas desde el año 1853 y hasta el año 2023. Al ser de sumo interés el estudio del Sol, analizamos el cambio solar, con el estudio del comportamiento acontecido desde el Ciclo Solar 19 y hasta el actual ciclo solar 25, en donde la incidencia de “enfermedades” y “Pandemias” es “coincidente” en razón del número de manchas solares, lo cual es una ventana de exploración científica, en razón del cambio climático. En la región del Istmo de Tehuantepec, no se han formulado políticas públicas eficientes que fortalezcan el quehacer bioclimático de las viviendas, por ello se incide en que la población de la Región Istmo mexicana, cuente con políticas públicas de integralidad sostenible con el uso de la energía solar y estrategias bioclimáticas, en beneficio de la sociedad en su conjunto.

Palabras clave: Istmo de Tehuantepec, habitat, cambio solar, Cambio Climático.

Abstract

The region of the Oaxacan Isthmus of Tehuantepec, a territorial site located in the Southeast of the Mexican Republic, presents incessant logistical activity, for the purposes of economic development, where territorial planning actions are close to achieving the “merger” of two strongholds. economic poles., the now named first world economy from the Asian Continent (CHINA) and the still potentially economy of the USA. Inaction in terms of territorial urban policy in accordance with the climatic offer of the site will result in community social deterioration and economic competition in general, coupled with the transgression of any urban policy implemented for sustainability purposes in the Region. Mexican Isthmus. The energy potential of the site is immense, today this region is number one in the production of wind energy at the national level, with a high radiant presence from the Energy of the Sun, which makes it conducive to integrating into the energy Mix of the Site, in benefit of nearly 2.4 million inhabitants. The study of the Habitat of the Interoceanic Corridor analyzes the solar irradiation close to 6 kWh/m² throughout the year, and its climatic “irregularities” from the year 1853 to the year 2023. Since the study of the Sun is of great interest, We analyze Solar Change, with the study of the behavior that occurred from Solar Cycle 19 to the current solar cycle 25, where the incidence of “diseases” and “Pandemics” is “coincident” due to the number of sunspots, which It is a window of scientific exploration, due to climate change. In the region of the Isthmus of Tehuantepec, efficient public policies have not been formulated that strengthen the bioclimatic work of homes, which is why it is emphasized that the population of the Isthmus of Mexico has public policies of sustainable integrality with the use of Solar Energy and bioclimatic strategies, for the benefit of society.

Keywords: Isthmus of Tehuantepec, Habitat, Solar Change, Climate Change.

Introducción

Desde los tiempos de la Conquista de México, y según datos históricos consecuentes de las acciones realizadas en el período de la Conquista Española, el llamado “Conquistador de México” Hernán Cortés, exploró la región del Istmo de la Nueva España por órdenes de Carlos V, con el objetivo de la visión futurista de “Unir dos mares”, es decir, el océano Atlántico y el océano del Pacífico. (Machuca, 2004).

Después de casi 504 años (partiendo de la incursión de la tercer expedición española del año 1519) se fortalece la “visión” de unir dos continentes, mediante la “Vía Terrestre” y la Línea “Férrea”, actualmente esta es planteada en el proyecto denominado “Programa para el Desarrollo del Istmo de Tehuantepec 2020-2024” (Segob, 2020).

Con lo anterior, la “Conexión” ambiciosa de “Dos Continentes” siempre será un objetivo logístico por alcanzar, entre los individuos y naciones que buscan con ello, tan solo la conectividad mercantil, sin considerar las llamados “daños colaterales” ocurridos entre los individuos residentes en el territorio, entendiéndose estos, los sociales, económicos, medio ambientales y de desarrollo sostenible.

El planteamiento de la integralidad con desarrollo armónico para el futuro, en concordancia con el medio ambiente energético, la cultura social y la dependencia económica de la región para lograrlo, constituye una imperiosa necesidad en tiempos modernos, donde las instituciones de gobierno y la sociedad, deben involucrarse de manera objetiva y puntual en el desarrollo sostenible, y no tan solo la incursión de polos de desarrollo que generan consigo el caos energético, incidiendo solamente en la oferta laboral de los habitantes, sin que estos formen parte directa e integral de los beneficios en el uso de las energías renovables del sitio.

El estudio presentado, explora el análisis del cambio solar y sus efectos en la salud de las personas, con una intención de analizar las fuertes “coincidencias” que se han generado a lo largo del tiempo de la humanidad industrial, referente a las condiciones cambiantes de la irradiación solar, esta en sus variables de inicio de ciclo solar y término del mismo, las cuales dan pie a terribles “enfermedades” y “pandemias” cada vez más recurrentes en un período tan breve, de tan solo 66 años, como es el caso del sarampión y hasta el SARS-Cov-2 recientemente expresado en términos de permanencia en la humanidad.

Por igual resulta importante el entender las condiciones de variabilidad del Cambio Climático a nivel global y su incidencia en la región, donde la tendencia es irreversible en el aumento del CO² y su permanencia en la atmósfera, se parte que en la era industrial los valores correspondían a 228 ppm, y para el mes de mayo del año 2023 estas rebasan ya los 424.49 ppm, considerándose un nuevo record mundial, al año 2023 se le llama al verano más caluroso en términos consecutivos desde los registros de 1880 (Viñas, 2023). El planeta Tierra tiende a la elevación de su temperatura de manera exponencial, en suma, por igual el ciclo solar 25 presente, es el que más intenso en los últimos 10 años con más manchas solares que ha presentado respecto del estudio desde el ciclo solar 19 (León, 2023).

En consecución de lo anterior, debo citar lo dicho por Páscuale Raía, paleobiólogo de la Universidad de Nápoles, Federico II (2020), el cual menciona:

Nuestros hallazgos muestran que a pesar de las innovaciones tecnológicas que incluyen el uso de fuego y herramientas de piedra refinada, la formación de redes sociales complejas y, en el caso de los neandertales, incluso la producción de puntas de lanza pegadas, ropa ajustada y una buena cantidad del intercambio cultural y genético con Homo Sapiens, las especies de Homo del pasado no pudieron sobrevivir al intenso cambio climático.

Otro aspecto de intereses, lo representa los daños irreversibles causados en la toma de decisiones desde las políticas públicas de bufete, jamás adaptativas ante los fenómenos perturbadores de alta incidencia en la región y que según “constante” presente, se habrá de convivir con los “sismos” en el futuro, sin embargo un ejemplo claro de la nula acción en materia de políticas públicas y pueblo en general, es el que ha escasos 6 años de los sismos de 2017, aún no termina la reconstrucción y se carece

de una “cartografía sísmica” que incida en la geotecnología que aplique la instalación de sensores sísmicos para la “alerta” temprana de la ciudadana, instalados estos en la largo de la costa del golfo de Tehuantepec y costa vecina del estado de Chiapas.

En este tema las decisiones unilaterales no consideran por lo regular a las personas, aún que en ellas se les mencionen como parte vital de las mismas, es decir; siempre se mencionaran, sin precisar una acción considerada de éxito. Igualmente, en este tenor, en la Región no existe una política pública eficiente y en concordancia con el “Desarrollo logístico del Istmo de Tehuantepec” que incida en el uso de energías renovables en beneficio de la población.

La región presenta una enorme hábitat regional con sus fortalezas y debilidades, es una región caracterizada por fuertes “vientos”, su clima cálido semihúmedo (tropical), la planicie de su orografía, la altitud predominante, sus vientos del norte (vientos tehuanos) con rachas capaces de generar energía eólica, así como de su enorme potencial de irradiación solar, su ruta ferroviaria comercial (transporte de carga), su entronque con la carretera panamericana y su conexión con la ciudad capital Oaxaca, su ramal a Veracruz y Chiapas, así como la ruta carretera a Juchitán y su enlace con la costa del Pacífico, entre muchos otros, propician que la región sea un punto estratégico y único por su permanencia en el tiempo y respeto a su identidad social, cultural, energética, ambiental, religiosa y arquitectónica, la pregunta obligada es ¿qué hace falta para ponderar el uso de energías limpias o renovables?

Muchas tomas de decisiones no son del todo claras, lo oculto o “innombrable” pesa más que la claridad de las acciones, si los polos planteados generan economía en la región, ¿por qué esta, no esta planteada de manera puntual? Con acciones que precisen el alcance y como en todo, la temporalidad inmediata o a largo, muy largo plazo. Luego importate es analizar lo “soterrado” para poder estar en condiciones de la oferta de una visión global futurista, para el todo y con todos, donde las causas sociales sean explícitas y estas se resuelvan de manera preponderante en beneficio del individuo y su entorno, es decir el ¡que queremos!.

Actualmente, la coyuntura política globalizadora y los desarrollos logísticos presentes, son una gran oportunidad para iniciar un enorme plan de acciones medioambientales y resilientes para la región del Istmo de Tehuantepec, estas van desde el uso de energía solar inmensa que ocurre en la región y su desarrollo sostenible en cuanto beneficios económicos, vivienda, conectividad tecnológica y movilidad sostenible, en el uso de vehículos eléctricos y transporte modales que utilicen tecnologías limpias para el transporte de pasajeros, en todo el territorio donde habitan los más de 2.4 millones de habitantes inmersos en el desarrollo logístico de la Región Istmo mexicana.

La perspectiva que se busca en la Región del Istmo de Tehuantepec es conjuntar una integralidad de acciones que tiendan al desarrollo sostenible, donde la oferta climática sea utilizable, con la participación de la sociedad y en respecto a sus tradiciones y cultura, donde la originalidad de sus pueblos, genera orgullo, los cuales por años

han protegido y convivido con el hábitat de su región, respetando el medio ambiente en sana armonía, entendiendo la adaptabilidad de los tiempos modernos, siempre y cuando, formen parte de la misma, en beneficio del y para el todo.

Objetivos

En la generalidad se busca primeramente determinar las enormes coincidencias en cuanto los efectos del cambio solar que repercuten en la humanidad, y como esta razón condiciona a determinar el diseño, las estrategias bioclimáticas y el uso de tecnologías sostenibles en el aprovechamiento de energías limpias en la Región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.

Para puntualizar de manera objetiva se pretende:

- Explicar las variables climáticas solares de irradiación solar, que han afectado y seguirán siendo causales de afectaciones en la salud del ser humano.
- Analizar las causales, oportunidades, las ofertas, fortalezas, amenazas, debilidades, la coyuntura, la visión de futuro, la política, lo soterrado, el hábitat, y la resiliencia del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.
- Ponderar la prospectiva regional en materia de energías limpias en la Región del Istmo mexicana.
- Formular el uso de herramientas tecnológicas sostenibles para la habitabilidad y resiliencia ante fenómenos perturbadores inherentes en la Región, que incidan en la vivienda tradicional.
- Generar acciones de fortalecimiento en la cultura del cuidado del medio ambiente.

Descripción de la metodología

El presente trabajo será desarrollado mediante una investigación documental, analítica, crítica y reflexiva, donde se explicará las condiciones del cambio solar y climático global, donde se determinarán los antecedentes antropológicos y climáticos inherentes en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.

Por ello un punto importante de mencionar en la metodología empleada, es el referente a la aportación profesional humanista al problema de estudio, es decir, se pretende ser objetivo, realista y con apertura para la formulación de propuestas regionales, que incidan incluso en el diseño de producto de invención sostenible, capaz de generar una tecnología de bajo gasto energético y nulo impacto ambiental para el comportamiento higrotérmico de la vivienda tradicional, respetando en todo momento el hábitat del lugar.

Con los resultados obtenidos mediante la experimentación, se harán las propuestas asertivas en cuanto a políticas públicas y estrategias bioclimáticas a implementar en la vivienda, para el confort interior y pleno Diseño Arquitectónico Sostenible (DAS), aunado al uso de energías renovables en beneficio de toda la Región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. El trabajo comprende un estudio eco-regional, partiendo de la importancia que brinda el “Istmo” de la República Mexicana en la unión del Golfo de México con el océano Pacífico, con ello tendremos como espectro universal la información publicada por los órganos de gobierno federales, estatales y municipales.

Así mismo habremos de limitar el estudio a la subregión llamada “Istmo de Tehuantepec”. El alcance eco-regional se justifica porque este corredor de más de 235 km en línea recta contiene las mismas características de clima, temperatura y altitud, además de la arquitectura características del clima cálido-subhúmedo y en el incide de manera potencial, el plan estratégico y plan maestro conceptual del corredor interoceánico Istmo de Tehuantepec; presentado por el gobierno de la república mexicana.

La investigación de tipo exploratoria será utilizada para el presente caso de estudio, representando novedosos campos del conocimiento, que son poco estudiados por su naturaleza y se diseña para generar investigaciones experimentales con sus respectivas variables de análisis, conduciendo lo anterior a investigaciones posteriores sobre el tema a tratar, explorando con ello un “Istmo del saber”.

Resultados

El terrícola es un ser humano insaciable por naturaleza, explora todo en su ambiciosa búsqueda del ORIGEN, buscando la respuesta al qué somos y de dónde venimos. El Humano analiza, cuantifica y cualifica, conjunta pensamientos, fundamenta ciencias, explora el universo, genera teorías, diseña espacios para la permanencia, crea “inteligencia” y vida “artificial,” entre otras necesidades para lograrlo. ¿Pero en realidad sabrá a dónde ir?, ¿sabrán comprender lo que encontrará?, ¿Estará satisfecho o simplemente descubrirá la verdad absoluta?, qué sucederá.

En esta incesante búsqueda de la VERDAD ya han pasado más de 251 años de los inicios del mundo industrial (invención de la máquina de vapor, patentada en el año 1769), el cual generó el desarrollo de la ciencia, la comprensión del pensamiento y la acelerada búsqueda del conocimiento. ¿Qué ha encontrado?, quizás mucho, quizás poco; igual nada; sin embargo, lo más interesante es saber que aún con tanto desarrollo tecnológico la respuesta es simple, falta mucho por descubrir. ¿Pero qué mueve a este mundo y a los habitantes del mismo?, se llama ENERGÍA.

Una energía fantástica que nos visita en el orden de mil por metro cuadrado por segundo, se conocen como los RAYOS CÓSMICOS, partículas altamente energéticas equivalentes a 1GeV (Gigaelectronvoltio, unidad en física de altas energías, equivale

a $1,6 \times 10^{-10}$ Julios), los cuales varían en GeV, en su llegada a la Tierra dependiendo de cuán lejanos provengan. Esta energía es superior a lo que podemos diseñar con los aceleradores de partículas (Mellado, 2016). Al respecto, Stephen W. Hawking (2002) en su libro *La teoría del todo* menciona:

Si tuviéramos una partícula con una energía por encima de lo que se denomina la energía de Planck, 10^{19} GeV, su masa estaría tan concentrada que se aislaría del resto del universo y formaría un pequeño agujero negro. La energía de Planck está muy lejos de las energías del orden de un GeV, que son las máximas que podemos producir en laboratorio en la actualidad. Salvar ese hueco requeriría un acelerador de partículas que fuera mayor que el sistema solar. (p. 136)

Nuestro dador de vida y energía única, el SOL, estrella con más de 5000 millones de años de evolución, capaz de encapsular rayos cósmicos para nuestra protección, y generar fenómenos en el entorno terrestre, tales como: tormentas magnéticas, auroras, perturbaciones ionosféricas, variaciones en la intensidad de la radiación solar, cambios de temperatura y alteraciones climáticas, y otros por relacionar; como es el caso de su influencia en la generación de los sismos, se encuentra en constante y cíclico cambio.

El Sol según estudios realizados actualmente por la NASA(SDO) en un período de 10 años (2010-2020), con más de 425 millones de fotografías, demuestra el desarrollo de las manchas solares más predominantes desde el año 2010 y hasta principios del año 2018 (máximo y mínimo solar). Las manchas solares se dan principalmente en el Ecuador Solar; mostrado en la figura 1, donde se observa con claridad la intensidad de las manchas solares durante 9 años aproximadamente y su descenso en intensidad en los últimos 2 años, para finalizar el ciclo solar 24 y dar inicio al ciclo solar 25.

Recordemos que desde 1755 se inicio la estadística del comportamiento solar en períodos de 11 años aproximadamente. Desde el año 2018 y a la fecha, se han considerado los últimos seis años, como los más calurosos de la historia, con altas temperatura. Sin embargo, el año 2020 fue considerado el más cálido desde 1880. (Atresmedia, 2020), siendo el 2023 el verano más caluroso en los últimos 10 años (León, 2023).

Lo anterior dicho por los científicos es normal, en el final-inicio de cada ciclo solar (aproximadamente cada 11 años), en nuestra estrella el Sol. A cada término de dicho período se invierten sus dipolos, para que en el próximo ciclo vuelvan a cambiar. Sin embargo, en 1645 y hasta 1715 se estudió el número de llamaradas solares, lo cual permitió descubrir un mínimo extraordinario, llamada MOUNDER. (Otaola. et al., 2017).

Los estudios de las manchas solares y su relación con la energía que llega a la Tierra, sugieren que cada 500 años aproximadamente se lleva a cabo una pequeña edad de hielo, analizado en la figura 2; la cual según varias teorías está próxima por venir.

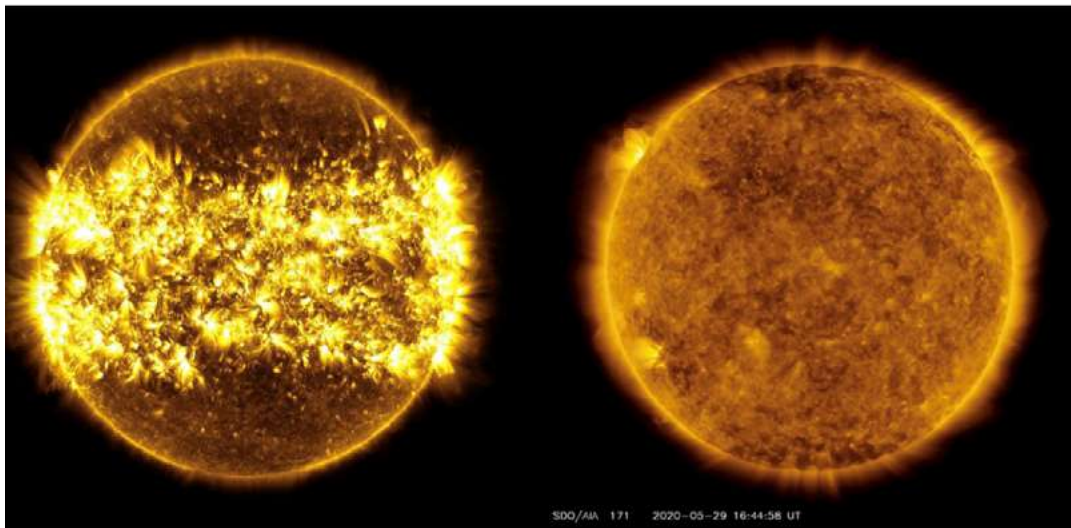


Figura 1. Video del comportamiento solar durante 10 años (2010-2020).

Fuente: <https://www.mdsc.nasa.gov/index.php/2020/06/24/vista-en-un-lapso-de-tiempo-10-anos-del-sol-desde-el-sdo-de-la-nasa/> Consultado: 28 abril de 2023

Mientras lo anterior llega a ocurrir, es de vital importancia conocer cómo la irradiación solar sobre el planeta y sus moradores, repercute en las más brutales “enfermedades” y “pandemias” ocurridas con mayor frecuencia en un lapso, en tiempos modernos de máxima industrialización, cambio climático y crecimiento poblacional.

HISTORICAL TOTAL SOLAR IRRADIANCE RECONSTRUCTION, TIME SERIES

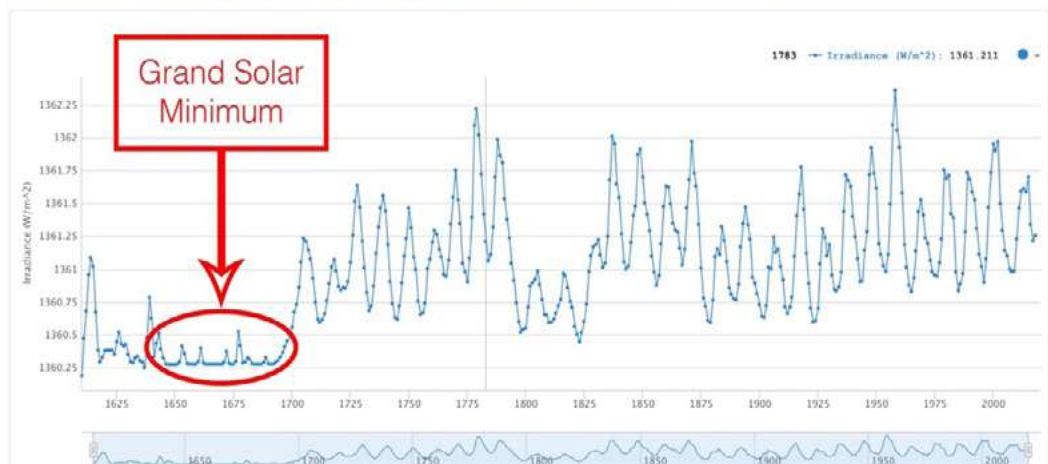


Figura 2. Análisis histórico del comportamiento solar llamado mínimo de maunder.

Fuente: <https://climate.nasa.gov/ask-nasa-climate/2953/there-is-no-impending-mini-ice-age/> Consultado: 25 abril de 2023

Recordemos que desde 1951 se presentan anomalías muy claras respecto al aumento de la temperatura media del planeta Tierra, a pesar de que los ciclos solares después del ciclo solar 19, son menores en cuanto al número de manchas solares, considerándose en los pronósticos futuros al actual ciclo solar 25 con máximo y mínimo solar del orden de los 1361.25 W/m², mucho menor en cuanto a manchas solares se refiere, igualando el promedio del ciclo 24 (Tran, 2020) recordemos que el Rey Sol, se encuentra a 93 millones de millas de distancia del planeta, sus rayos de luz, tardan tan solo 8.3 minutos en llegar al planeta Tierra.

El ciclo solar número 19 ocurrido entre 1954 y hasta 1966, es el que más manchas solares a presentado en la historia, y el que representa el inicio del estudio de anomalías solares (1951), mostrado en la figura 3. En dicho período la irradiación solar fue superior a los 1362.25 W/m². La teoría de una pequeña edad de hielo (mínimo de Maunder) puede ser factible teóricamente, pero los GEI revertirán este proceso natural del planeta Tierra, con lo cual la temperatura del planeta Tierra seguirá en aumento.

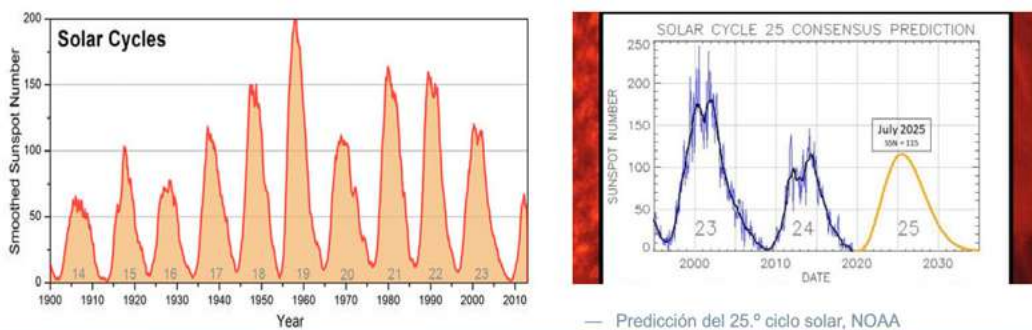


Figura 3. Seguimiento del ciclo solar, NOAA.

Fuente: https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/25.1_ciclo_de_actividad_solar_el_Sol_despierta. Consultado: 28 abril de 2023

La física solar, rama de la astrofísica que estudia al Sol, considera que los cambios en la atmósfera solar inciden en las temperaturas y como consecuencia en el clima del planeta Tierra. El Sol irradia todo el tiempo, pero por el fenómeno de rotación y traslación de la Tierra, los cambios de temperatura suelen darse según cuatro estaciones del tiempo, y en períodos de alta intensidad mensual.

El origen del aumento de temperatura en el planeta Tierra, viene ocurriendo desde la mitad del siglo XVIII, con el inicio y desarrollo de la llamada Revolución industrial, sin que a la fecha termine, estos procesos industriales altamente contaminantes a base de carbón, así como el descubrimiento del petróleo y sus derivados para todo uso, han elevado la temperatura media del planeta Tierra con base de los GEI emitidos a la atmósfera.

Una teoría en tiempos modernos, obviando las coincidencias, es la que mantengo, en el sentido de que entre más radiación solar reciba el planeta Tierra al inicio de los ciclos solares, (aunque los últimos ciclos solares son menores en intensidad solar que los anteriores) se presentan enfermedades pandémicas, para entender estas “coincidencias” nos referimos a 1954, inmerso en el ciclo solar 19, en donde se descubre la enfermedad llamada sarampión, la cual alcanzó una tasa de letalidad del 2.0%, causando cerca de 200 millones de muertes aproximadamente, esta enfermedad ocupa el lugar número 2, en enfermedades letales de la historia.

En el 2002, al final del ciclo solar 23, se descubre la enfermedad SARS-Cov, con una tasa de letalidad del 9.6%, causa 770 mil muertes aproximadamente, ocupando el lugar 26 de enfermedades letales, este ciclo solar dura 12.3 años, siendo el cuarto ciclo, más largo de la historia. (Wikipedia, 2020).

Al inicio del ciclo solar 24 (4 de enero de 2008) la pandemia de la gripe A (H1N1) nuevamente se presenta en la Tierra (ya había ocurrido en 1918 (SC 15) cuando fue descubierta por primera vez. La infección dura del 11 de junio de 2009 hasta el 18 de septiembre de 2010. Ocupa el lugar 17 de enfermedades letales. Causa la muerte de 284 mil personas aproximadamente.

En 2012 al termino del ciclo solar 24, se descubre la enfermedad MERS-CoV, con una tasa de letalidad del 35 %, causando la muerte de 935 mil personas aproximadamente. Ocupa el lugar 25 como enfermedad letal. Hoy la pandemia SARS CoV-2 (covid-19) una variable de la influenza, inicia en diciembre del 2019 (inicio de ciclo Solar 25), se declara Pandemia el 30 de enero de 2020, el 5 de mayo del 2023, se declara el fin de la emergencia. Ocupa el lugar 10 en enfermedades letales, con una tasa de letalidad del 1.25 %, causando la muerte de 6.8 millones aprox, de personas (existiendo la posibilidad real de víctimas por el orden de 20 millones) a nivel mundial. Según la ONU, la pandemia SARS CoV-2, ha conducido a más de 250 millones de personas a la falta de alimentos y su consecuente afectos en la salud, es decir la desnutrición, otros 176 millones de personas serán los nuevos llamados pobres, con lo cual el objetivo de la Agenda 2030, se ve incumplido.

En la figura 4, se analiza el comportamiento de las manchas solares desde 1796 y hasta 2020, con la aparición de “enfermedades y pandemias” letales, en los últimos 66 años.

La correlación en la existencia de “ocurrencias” tan solo es una constante de enfoque, las “coincidencias” o reloj de la naturaleza, en ocasiones de vuelve un caso “no explicable” por la ciencia. La viruela ocupa el primer lugar como enfermedad letal que causo la muerte de más de 300 millones de personas, su descubrimiento ocurre en 1796 (en plena Revolución industrial) con una tasa de letalidad del 30%, coincidiendo al final del ciclo solar 4 e inicio del 5, este ciclo solar duró 13.6 años, el más largo registrado al momento (Wikipedia, 2023).

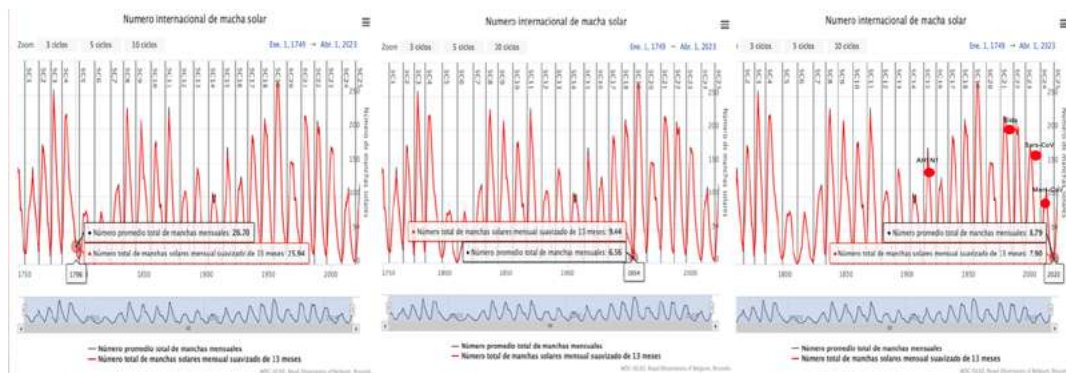


Figura 4. Número de manchas solares por ciclo solar.

Fuente. <https://www.spaceweatherlive.com/es/actividad-solar/ciclo-solar/ciclos-solares-historicos.html>. Consultado: 28 abril de 2023.

En los últimos tres ciclos solares (final del 23, inicio 24 e inicio del 25) el “descubrimiento” de enfermedades letales para la humanidad son muy “incidentes” en tiempo. Así mismo el CO², en referencia desde la presencia de la enfermedad Sars-CoV (2002) y hasta el término del SARS CoV-2 (covid-19) en el 2023, se ha incrementado de manera notable, con récords históricos.

En los últimos años, la humanidad se a enfrentado a 5 grandes enfermedades pandémicas (sarampión, sida, SARS-CoV, Mers-CoV y SARS-CoV2), las cinco en suma alcanzan 298.5 millones de victimas mortales aprox. La Segunda Guerra Mundial generó cerca de 100 millones de muertes aproximadamente.

Otras sociedades modernas, dicen que el cambio climático no existe y abandonan acuerdos, rectifican y vuelven con mayor impulso, incluso generando la gran expectativa rectora para los logros en materia ambiental para el año 2030.

El Cambio Climático es la frontera existencial de la humanidad, si esta no se logra mediar entre todos los responsables, es decir, todos los habitantes del planeta Tierra, las metas en la disminución de los GEI como consecuencia de nuestros procesos industriales y de acción social, no tendrá un buen principio. ¿Por que un buen principio? No iniciamos de cero con la toma de decisiones en materia ambiental, partimos ya de un resultado, altos niveles de contaminación atmosférica, que dañan al ser humano, procesos biológicos y evolutivos, así como afectaciones al cambio del clima en todas las regiones del planeta Tierra, incluyendo los mares y polos terrestres; luego entonces es un buen principio sólido que nos hace reflexionar la causa y efecto.

Si al tener esta enorme oportunidad del conocimiento de nuestras acciones, los resultados deberán ser a partir del caos. La pandemia SARS CoV-2 indujo en la ciencia nuestra gran vulnerabilidad ante el medio ambiente, un virus “vivo” tan pequeño de entre 9 y hasta 140 nanómetros, dependiendo del área donde incube; ha sido capaz de paralizar en alguna medida la vida productiva e industrial del planeta Tierra. Este

caos, del cual aún no progresamos, no fue límite para la reacción en masa de nuestro quehacer evolutivo, por el contrario, a incrementado nuestra alta demanda energética y como consecuencia altos niveles de contaminación producto de los GEI.

El caos climático debería ser respondido igual que la actual pandemia SARS CoV-2, con tecnologías inmediatas y urgentes que atiendan la disminución de los gases de efecto invernadero, apoyos directos financieros para la instalación de sistemas energéticos como los paneles solares y aerogeneradores domiciliarios, implementación masiva del transporte ecológico, movilidad alta en las urbes mediante otros tipos de transportes, etcétera; ¿pero qué nos falta para ello?

Por nuestra razón de pensamiento evolutivo, creo que entendemos a partir de la desgracia, cuando ya tenemos el problema enfrente, pero aún así lo evadimos ¿La causa? Nuestra falta de respeto al medio ambiente y nuestro comportamiento de libertad, donde todo lo que vemos, estará a nuestro alcance, no importando lo que se haga, con tal de conseguirlo, incluyendo el daño a terceros.

Estudios recientes realizados por el observatorio Mauna Loa de los EE. UU., demuestran que en mayo del 2020, la concentración de CO² a la atmósfera, llegó a niveles de 417.2 ppm, en comparación con el pico más alto del 2019 medible en 414.8 ppm, lo que se deduce en que si no hubiera existido una “inmovilidad” por la pandemia, el valor alcanzado para mayo del 2020 sería de 417.6 ppm (Fiona, 2020). Como se observa, la diferencia de 0.4 ppm respecto a lo alcanzado y lo programado es mínima, pero muy importante en los valores de reducción de gases de efecto invernadero (1 ppm es igual a 1 miligramo por litro).

Recordemos que, en los inicios de la preindustrial en 1780, se dice que los niveles de CO² en la atmósfera eran de 228 ppm (Redaccion, 2019). Desde 1955 se ha incrementado de forma exponencial el CO² sin visos de decrecimiento a la fecha. En mayo del 2002 (SARS-CoV) la presencia del CO² en la atmósfera fue de 375.69 ppm. Para volver a condiciones atmosféricas de hace 220 años (inicio de la era industrial) se necesitarán unos cientos de años, si se cumplen las acciones para el año 2030 y su meta al 2050.

Durante la pandemia 2020 de SARS CoV-2 los niveles récord de CO² se incrementaron hasta 417.2 ppm, en el 2021 fue de 421.36 ppm, para el 2022 fueron 421.59 ppm; al presente mes de mayo del 2023, los datos diarios récord son impresionantes, con un máximo de 424.49 ppm. La tendencia de CO² presente en la atmósfera seguirá a la alza, luego entonces el incremento de temperatura media del planeta Tierra lo hará por igual. En la figura 5, se muestran las variables de CO² en la atmósfera.

El ciclo solar 25, en su primer año 2020 (de los 11 años que tarda en cumplir su ciclo total aprox) se consideró el segundo más caluroso desde las mediciones que se tienen de este Astro rey. El 2016 ocupa el primer lugar, ocurrido al final del ciclo solar 24, que no es cuando emite la mayor radiación, si no al principio de cada ciclo solar, luego entonces; el problema no es el Sol, son los GEI emitidos a la atmósfera por las actividades humanas que provocan el efecto invernadero humano.

Promedio Diario Reciente Mauna Loa CO₂

19 de mayo:	422,39 ppm
18 de mayo:	422,07 ppm
17 de mayo:	423,31 ppm
16 de mayo:	424,49 ppm
15 de Mayo:	424,28 ppm
Última actualización: 20 de mayo de 2023	

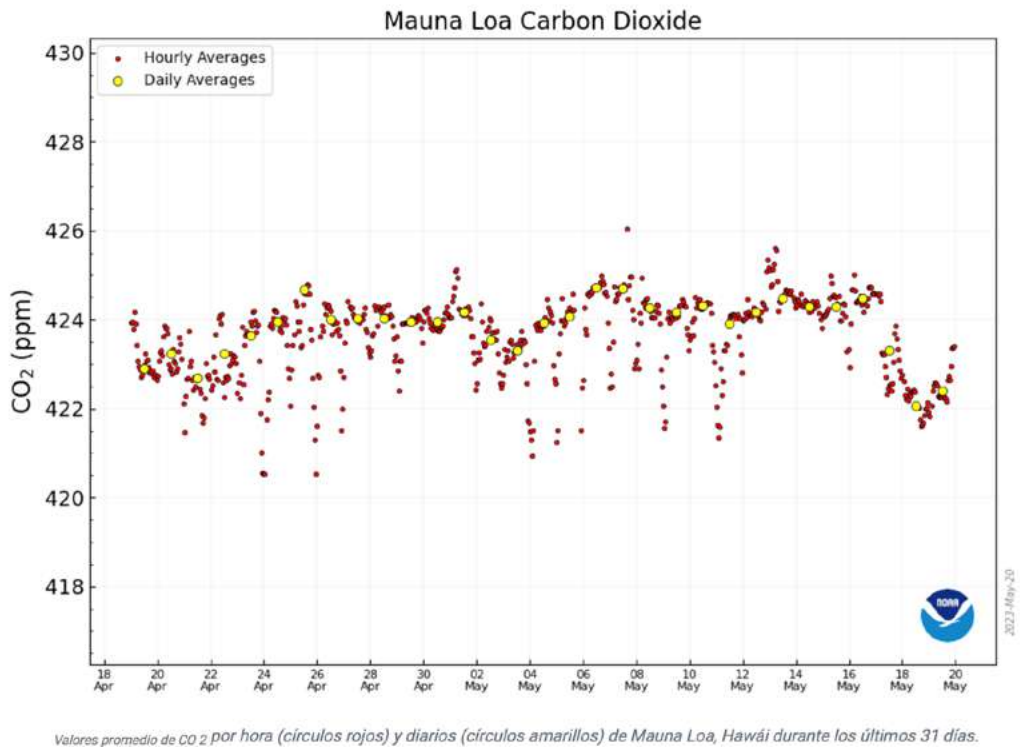


Figura 5. Comportamiento del CO₂ mensual.

Fuente. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/monthly.html>. Consultado: 28 abril de 2023

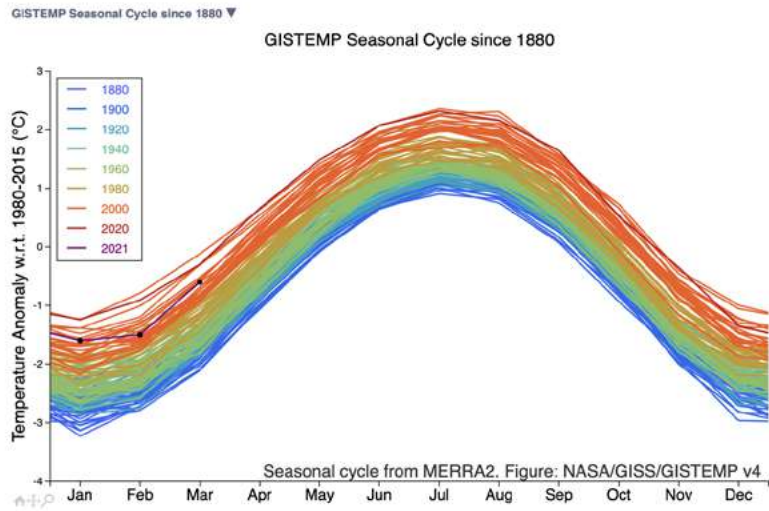
El problema no es el efecto invernadero atmosférico, sino la alteración de los equilibrios naturales con el incremento de gases que producen dicho efecto, es decir, nuestra huella de carbono. El impacto Humano sobre el clima terrestre conocido como ANTROPOCENO, NO SE DETIENE, incluso una pandemia mundial sanitaria (SARS-CoV2), NO fue causal para impedir la emisión de Gases de Efecto Invernadero en demasía, enviados a la atmósfera.

La conclusión es simple, aun a menos movilidad (personas y vehículos) principalmente, los acumulados históricos de dichos gases se mantienen en la Atmósfera como un gran “colchón” de reserva dañina por mucho tiempo más, para la humanidad. Cada término de año, se concluye como el más contaminante en materia de CO₂.

Las anteriores cifras tan solo son comparables con los pronósticos de hace 3 millones de años, cuando solo éramos organismos unicelulares viviendo los inicios de la gran oxidación. Con esta línea en el tiempo tan dramática, se pone en el balance de la sobrevivencia toda acción urgente que se debe llevar acabo de manera apremiante para intentar, lo antes posible, dar el gran paso “el inicio de la limpieza de la Atmósfera”, reto verdaderamente posible de lograr, quizás por la actual generación no, pero sentaremos las bases para ello, en beneficio de las próximas generaciones que habitaran el planeta Tierra.

Entre 1880 y 2012 la temperatura promedio aumentó 0.85 °C. Para el 2022 se reconocen 1.1 °C, considerado este año, el sexto más caluroso, de ocho consecutivos, desde el siglo XVIII. Las metas de lograr contener en 1.5 °C, al momento están siendo alcanzadas de manera desfavorable con 1.1 °C. en la figura 6, se muestra el comportamiento en cuanto a la elevación de la temperatura promedio desde 1880. El 9 de agosto de 2021, el Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su comunicado 2021/17/PR, correspondiente al sexto informe de evaluación (IE6); indica que a menos que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan de manera inmediata, rápida y a gran escala, limitar el calentamiento global a cerca de 1.5 °C o incluso a 2 °C será un objetivo inalcanzable.

GISTEMP v4 (análisis de temperatura superficial) desde 1880



Nota. Los meses de mayor anomalía se presenta en junio-julio, donde claramente se ve el enorme incremento en valores de hasta 2.3 ° C. Proporcionado por la NASA. (2021). [imagen]: Ciclo estacional GISTEMP desde 1880. (https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/) dominio público.

Figura 6. Gráfico de temperatura promedio del planeta desde 1880.
Fuente. https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/). Consultado: 28 abril de 2023

La COP 26, celebrada en Glasgow (2021) Escocia, acordó persistir sobre los objetivos del Acuerdo de París, limitar el incremento de temperatura media mundial a 2.0 °C, por encima de los niveles preindustriales, y “esforzarse” por no rebasar los 1.5 °C aceptando el incremento de 1.1 °C de la temperatura media del planeta, a la fecha. La neutralidad climática para el 2050, está en duda. El cambio climático daña a las personas, destruye ecosistemas y modifica todo medio de vida del planeta, con altos riesgos migratorios y sociales. Es una realidad, con suma de procesos evolutivos naturales del planeta Tierra.

El mapa Global de Temperaturas Atípicas, mostrado en la figura 7, muestra los comportamientos “irregulares” de aumento/disminución de temperatura en regiones del planeta, en la medición de enero a marzo 2023, la incidencia se observa con mayor inconsistencia en el hemisferio norte. Esta se presenta en territorios del noroeste de Canadá, con hasta +13.66 °C de “anomalías”, mientras que, en el continente europeo y asiático, son del orden de + 6.59 °C en Sarátov, Rusia. Por igual “anomalías” frías se presentan en Dakota del Norte, EE. UU con -6.93 °C.

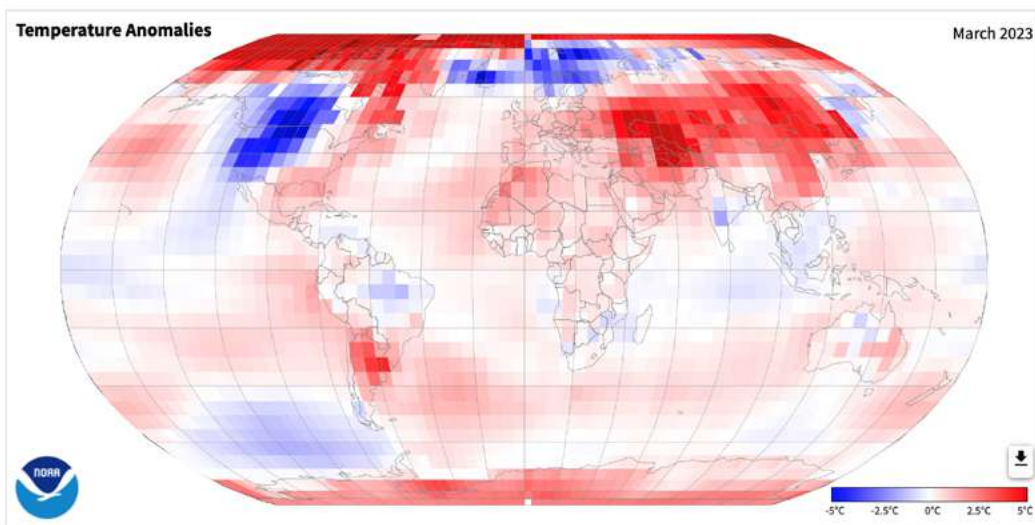


Figura 7. Mapa Global de Anomalías.

Fuente. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/mapping/202303>. Consultado: 28 abril de 2023

La simbiosis entre el comportamiento solar y las anomalías atmosféricas infringidas por el desarrollo humano del planeta (Cambio Climático) producen en conjunto efectos de temperatura positivos y negativos con sus diferentes variables y consecuencias, estas son por igual suficientes para el beneficio de la humanidad. Entender esta relación obligada nos armoniza con el todo climático, social y económico del habitat que ocupemos.

Lo humano en este momento siempre nos habla de habitantes en el planeta Tierra (8 mil millones de personas y más) nuestro planeta es el único lugar de la galaxia (hasta el momento), donde existe la vida tal y como la vemos los humanos, desde la vida

microbiana hasta los seres “pensantes”, esta mutación tierra-humanos, nos llevará según los datos científicos y si antes no ocurre algo extraordinario o sorprendente, a una convivencia disímbola durante 5 mil millones de años.

Muchos seres han perecido en el tiempo y otros perecerán en el futuro. No se trata del más fuerte en ocasiones, sino de quién es más inteligente que otro para destruirlo y sobrevivir. Con las realidades climáticas al momento del planeta Tierra, y la prospectiva de todas las Naciones Unidas actualmente (50 países que firmaron los acuerdos en la COP 26) de las 194 comprometidas en los Acuerdos de París, para la búsqueda de soluciones respecto del Cambio Climático, nos queda claro que, para un desarrollo sostenible en armonía con el Medio Ambiente, dependemos de la oferta energética gratuita, que por lo menos estará con nosotros como humanidad, durante largo tiempo.

¿Cómo lograremos sobrevivir esta etapa, en la línea finita del tiempo en el planeta Tierra? Si diseñamos en función del medio y con las TBGE al alcance, podremos incidir en un enorme comportamiento social que con lleva efectos positivos en la disminución del cambio climático, principalmente al tema de las emisiones contaminantes de carbono, producto de nuestras edificaciones y procesos antropogénicos.

El PNUMA en su informe 2023 de la División de Ecosistemas del Programa para el Medio Ambiente de la ONU, advierte de la peor sequía en 40 años, con graves afectaciones a la biodiversidad del planeta, con fuertes impactos en la producción agrícola, aunado a este, la escasez cada vez mayor de la precipitación pluvial en ciertos lugares y en otros en demasía. La lucha por el AGUA en su concepto general será notoria de aquí al 2030, tiempo fijado como meta para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.

Los fenómenos perturbadores tales como sequías, incendios, deshielos, huracanes, tornados, inundaciones, sismos, erupciones volcánicas, etcétera; continuaran acechando con mayor fuerza al planeta, afectando a la población más vulnerable, causando grandes conflictos sociales. Los deshielos polares habrán de acelerar la gran necesidad tecnológica para la obtención del vital líquido.

Respecto del hábitat Mexicano, el país recibe una irradiación solar de 19 megajoules/m², radia 5.3 kWh/m² día, casi los 365 días del año, en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, el promedio anual de radiación solar es de los 6 kWh/m² todo el año. El potencial eólico en México es de 40 000 MW, con una capacidad instalada de 185 MW, el potencial solar instalado es de 1.7 GW.

Oaxaca cuenta con el parque eólico más grande de América Latina (132 aerogeneradores) de más de 1,800 aerogeneradores en 28 parques eólicos instalados en la Región del Istmo de Tehuantepec. El Istmo de Tehuantepec debido a la gran fuerza eólica instalada en los últimos años, es símbolo de oferta mundial y primer generador de la misma, a nivel nacional, se carece al momento de parques solares. La Región del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, ofrece un enorme potencial energético, tanto solar como eólico, en beneficio de 2.4 millones de habitantes entre ambos estados (OAXACA-VERACRUZ).

Sin embargo, las variables de temperaturas en la región son por igual significativas, a la par de las mismas de manera global, es importante conocerlas para la toma de decisiones, principalmente en materia de salud y de uso de energías renovables. en la figura 8, el modelo indica una variable de 0.94 °C actualmente para el año 2023.

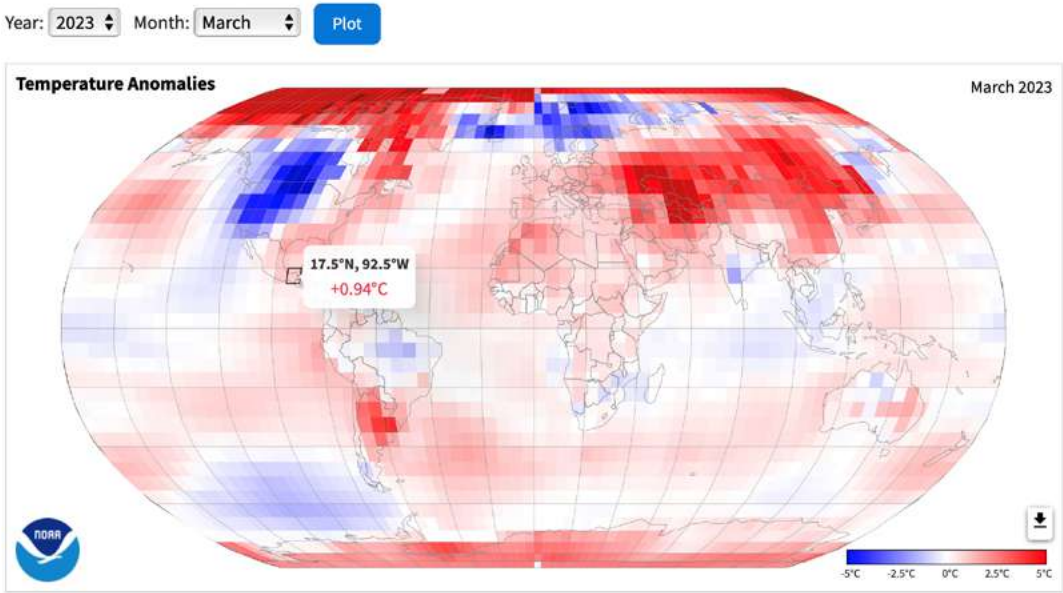


Figura 8. Mapa Global de Anomalías específicas.

Fuente. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/mapping/202303>. Consultado: 28 abril de 2023

In the interactive chart below, the 5 warmest years, 5 coolest years, and current year are highlighted to stand out. All other years are in light gray.

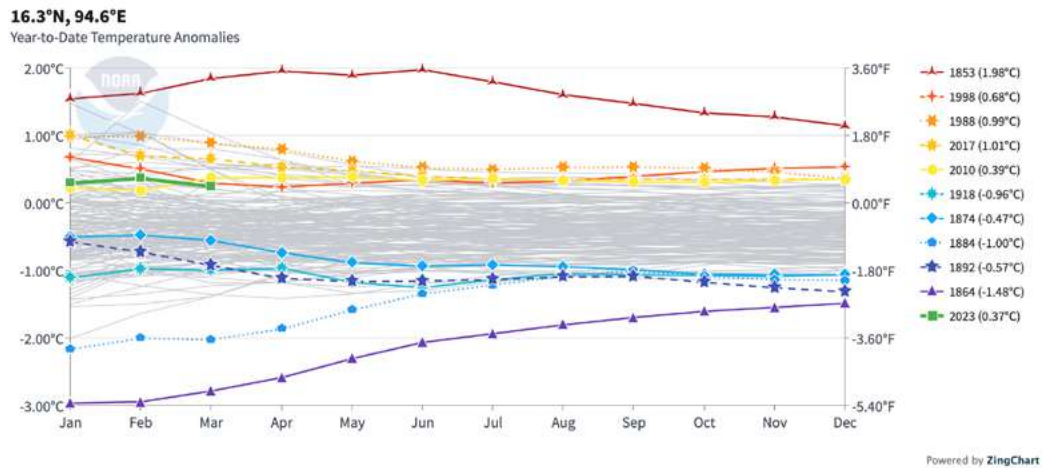


Figura 9. Mapa Global de Anomalías específicas.

Fuente. https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/hawwood/16.3,94.6/land_ocean. Consultado: 28 abril de 2023.

La línea del tiempo climático indica que en 1853 existió un incremento de temperatura de 1.98 °C respecto de la normal, en la Región del Istmo de Tehuantepec. El año 1864 tuvo en decremento de -1.48 °C, siendo el más frío respecto de la normal climática. Para el año 2023, los valores de incremento se mantienen por debajo de los 0.38 °C en los tres primeros meses del mismo. Lo anterior se expresa en la figura 9.

En correlación con los últimos 8 años de continuidad en el aumento de la temperatura media global, el comportamiento observado desde el año 2015, es permanente en su variable de incremento, en el año 2015 fue de + 0.29 °C y en el 2023 es de +0.35 °C promedio. La tendencia se observa en la figura número 10.

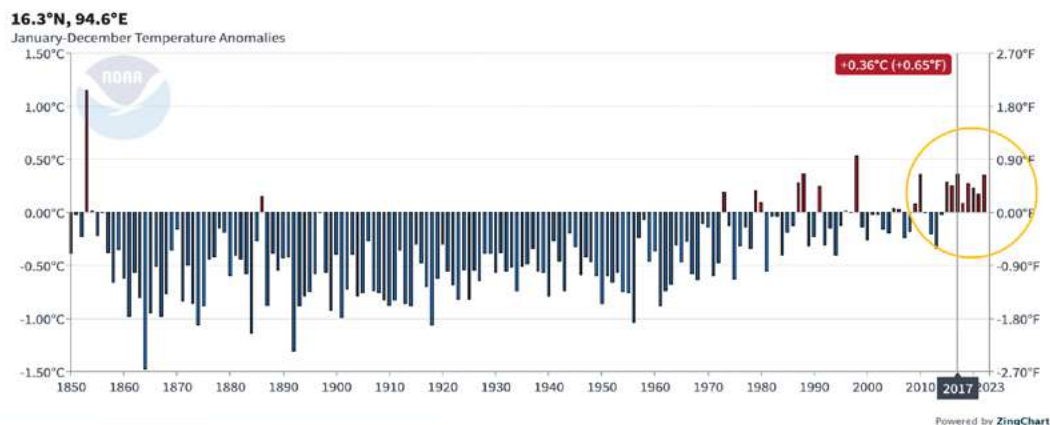


Figura 10. Mapa Global de Anomalías específicas.

Fuente. https://www.nci.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/16.3,94.6/land_ocean/ann/5/1850-2023. Consultado: 28 abril de 2023.

El proyecto del “Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec” es uno de los planes más ambiciosos y eternamente buscados en la conexión del flujo económico entre Asia y el Pacífico mexicano, con el único objetivo de un mercado libre de consumos entre EE. UU. y Asia. El programa regional derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, contempla en sus fundamentos, lo siguiente:

Con la coordinación del Corredor Interoceánico, se modernizará el ferrocarril del Istmo de Tehuantepec, de los puertos de Coatzacoalcos en Veracruz y Salina Cruz en Oaxaca, se fortalecerá la infraestructura carretera y de caminos rurales, así como la red portuaria y se construirá un gasoducto para abastecer a empresas y consumidores domésticos. Asimismo, se crearán polígonos a lo largo del Istmo de Tehuantepec que contarán con incentivos para atraer inversión que detone el desarrollo económico y social de la región, con base en las vocaciones productivas con mayor potencial. (DOF, 2020, p. 1).

Solo en el párrafo 18, del apartado “Análisis del estado actual”, menciona como una alta prioridad el mejoramiento de la vivienda y un programa de construcción, en ningún apartado señala el “uso de energías renovables”. Por su parte el PDIT (Plan de desarrollo del Istmo de Tehuantepec) en su descripción, punto número 6; menciona: “6. Energía eléctrica: Desarrollo de centrales eólicas para la generación eléctrica en la región de Ixtepec, Oaxaca...” (México, 2019, p. 1).

En ningún caso esta enorme estrategia globalizadora, incide sobre el uso, manejo, y disposición de las energías renovables en las viviendas. El solo hecho de mencionar “gasoducto... para consumidores domésticos” implica un gran proyecto de infraestructura y sus derivaciones domiciliarias, con el riesgo latente de accidentes o intervenciones delictivas en líneas de conducción.

En dicha región de influencia, el universo de atención desde el punto de vista demográfico, se cierra a 79 municipalidades, de las cuales 46 son integrantes del territorio del estado de Oaxaca y 33 municipios, lo son del estado de Veracruz de Ignacio de la Llave. La región del Istmo de Tehuantepec, compuesta de 46 municipios con una población de más de 683 mil habitantes según último censo INEGI, representa un enorme mercado de aplicación de las energías renovables en las viviendas, si se suma la población colindante del vecino estado de Veracruz, otros 33 municipios con más de 1.7 millones habitantes, el total de acción climática correspondería a 2.4 millones de habitantes beneficiados en el uso de energías renovables. Existen en esta región 172 localidades sin servicio eléctrico. En la figura 11, se ejemplifica dicho alcance a nivel global.



Figura 11. Plan Maestro Conceptual del CIT.

Fuente. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/673314/Resumen_ejecutivo_completo_VPWEB.pdf. Consultado: 28 abril de 2023.

Si no se realiza una simbiosis o sinergia entre ciudadanos, gobierno, apoyos de organizaciones civiles, fundaciones; etcétera; con los beneficios de la energía solar y eólica de la región para las comunidades y ciudadanos en conjunto, se corre el inminente riesgo ante la “modernidad” que traerá el plan maestro conceptual del corredor interoceánico de la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca; de no concretar la visión mundial del uso de las energías renovables para dar valor a las comunidades y defensa de su cultura y patrimonio cultural, edificatorio y social de cada comunidad. El reciente Decreto Presidencial del 18/05/2023; prioriza a la región como un polo

de “seguridad nacional”. En la figura 12, el Plan ejecutivo del CIT muestra la propuesta de un polo de desarrollo, el cual a la vista da la impresión de sostenibilidad, sin embargo, al observar la periferia circundante del mismo, no se observa un desarrollo incluyente.



Figura 12. Resumen Ejecutivo Completo del CIT.

Fuente. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/673314/Resumen_ejecutivo_completo_-VPWEB.pdf. Consultado: 28 abril de 2023.

Inversiones por más de 12 mil millones de pesos mexicanos son ejercidas para consolidar el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, con acciones globales en la producción de gasolinas, generadas en territorio de los EE. UU., con esta cantidad se podrían instalar más de 48 granjas solares de 15 mil paneles solares cada una, capaces de brindar energía a una población promedio de 768 mil habitantes en el corredor istmeño mexicano, superior a toda la población de la región, consistente en 683 mil personas, según censo de población INEGI 2020, con lo anterior se contribuye a reducir 336 mil toneladas de CO² a la atmósfera.

Queda claro que el plan estratégico y plan maestro conceptual del corredor interoceánico Istmo de Tehuantepec, presentado por el gobierno de la república mexicana, tan solo comprende acciones de conexión férrea, y ninguna acción en el uso y disposición de energía solar, mediante granjas solares, solo se limitan a la generación de parques eólicos. En la figura 13, se describe el valor ambiental de la región.

En contraposición, el día 8 de junio del 2020, la vicepresidenta de los EE. UU., Ms. Kamala Harris anuncia en la Ciudad de México, una inversión millonaria por el orden de los 250 mdd, en el sur de la república, es decir el Istmo de Tehuantepec, consiste en propuestas de proyectos de infraestructura, misión comercial de tecnologías ambientales, construcción de viviendas de bajo costo y fortalecimiento de la industria agrícola (Arroyo, 2021).

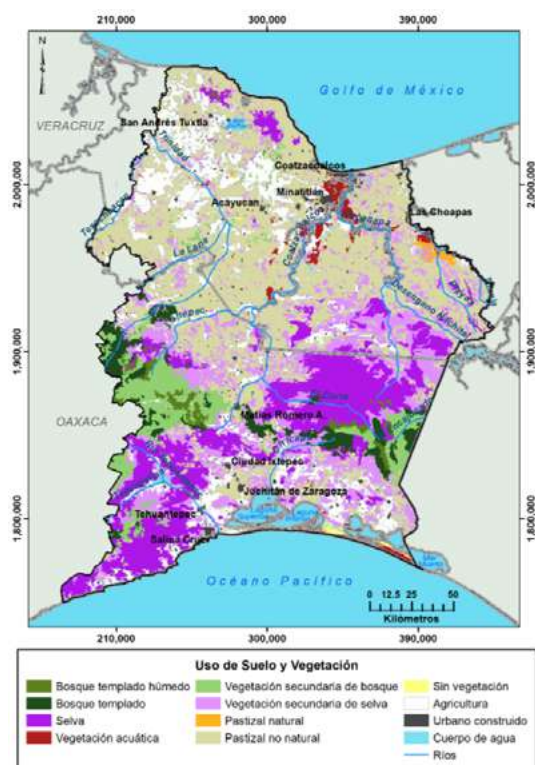


Figura 13. Uso de suelo y vegetación del corredor del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.

Fuente. https://diariooficial.gob.mx/nota_to_pdf.php?fecha=04/08/2020&edicion=MAT
Consultado: 28 abril de 2023

Ambiciosamente las proyecciones que realizan los instrumentos reguladores de la planeación del Istmo de Tehuantepec, hablan de 550 mil nuevas oportunidades de empleo hasta el año 2050 (México, 2020) y después de esto, ¿habrá una región lo suficientemente sostenible en cuanto a energía solar y su consecuencia, la generación de electricidad para efectos de cambio climático y disminución de costos en el pago de servicios eléctricos?

Si un plan con disposiciones tan millonarias, cerca de los 4400 millones de pesos mexicanos a invertir de manera inicial de un total de 20.000 millones de pesos mexicanos (T21, 2020) con planes para que en el año 2023 entre en operaciones, en cuanto al transporte de mercancías por vía férrea por lo menos, ¿por qué no plantea la construcción de granjas solares? Recientemente se ha puesto en “prueba” el transporte ferroviario de pasajeros en la región, sin que hasta el momento se cuente con fechas exactas para su desplazamiento, el cual en términos de movilidad, es un gran paso para la región.

La respuesta esta en que seguimos obviando la urgente necesidad del uso de energías limpias, y continuamos, como hace 220 años de industrialización, contaminando el ambiente hoy con locomotoras diésel, que en el año muy cercano del 2023, veremos enormes convoyes ferroviarios transportando por igual miles de mercancías entre el

continente asiático y EE. UU., con la consecuente huella de carbono en la región, ya que estos transportarán productos refinados del petróleo y sus derivados, entre dos puertos, el de Salina Cruz en Oaxaca (con refinería) y el de Coatzacoalcos con igualmente otra refinería en Minatitlán, Veracruz.

La oferta en la tecnología solar con el panorama anterior, se vuelve insoslayable y de extrema urgencia, para diseñar políticas públicas en favor de la sociedad civil en general, con el impulso necesario para el balance energético en las viviendas tradicionales de la región, generando ahorro económico en la población del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México.

La consecuencia de la energía solar, son los vientos, los cuales en diferentes regiones del planeta Tierra son aprovechados para la obtención de energía eléctrica, mediante diferentes tipos de aerogeneradores, quienes mediante turbinas consiguen la suficiente carga para la posterior conversión en energía, y su consecuente resultado, la energía eléctrica.

Los vientos permanentes, dominantes o predominantes, no ocurren en todos los lugares, estos se dan en zonas de fuerte convección térmica, donde corrientes de aire frío chocan con las cálidas, generando valores importantes de viento, estos son ayudados por la superficie de contacto de las montañas, generando fuertes velocidades, las cuales en su mayoría son comparables con las generadas por los huracanes, en sus diferentes categorías. Entre mayor altura se consiga, mayor fuerza del viento se obtendrá, y no me refiero a los aerogeneradores, sino, a las montañas. Pero igualmente la tecnología actual usada en los aerogeneradores normaliza buenos vientos a alturas de hasta 30 metros, tierra adentro, y para el caso de los instalados fuera de costas (mar adentro), hasta de 100 metros, con capacidades actuales logradas como de última generación, de hasta 12 MW. En la figura 14, se muestra el complejo eólico Oaxaca II-III-IV del Grupo Acciona, existente en la región del Istmo de Tehuantepec.

Regionalmente la energía eólica generada en la microrregión del Istmo de Tehuantepec, y en base al plan trazado de comercio internacional entre Oaxaca y el estado vecino de Veracruz, debe beneficiar a igual número de habitantes de esta región, 2.4 millones de habitantes. Sin embargo, la microrregión de Oaxaca es la única generadora de energía eólica con más de 28 parques eólicos, 1800 aerogeneradores y con expectativas de crecimiento en el corto plazo, y no Veracruz, quien al momento contempla el mayor número de habitantes beneficiados con 1.7 millones en 33 municipios, pero ellos cuentan con la planta nuclear de Laguna verde, con sus riesgos y peligros latentes.

En materia de energías limpias, tan solo el estado de Veracruz ha apostado por la instalación del primer parque eólico en su entidad, está ubicado en el municipio de Alvarado, Veracruz; en límites con los municipios de Tlacotalpan y Lerdo de Tejada. El proyecto indica la instalación de 20 aerogeneradores puestos en tierra y una potencia instalada de 40MW, en una superficie de 1,732 hectáreas (E-Consulta, 2017), los inconvenientes es que este sería instalado en humedales.



Figura 14. Parque eólico Oaxaca II-III-IV del Grupo Acciona en el Istmo de Tehuantepec.

Fuente. Archivo fotográfico propio 2016. Consultado: 28 abril de 2023.

Otra razón observada es que debería aprovecharse la energía de los océanos con la instalación de este parque, es decir que este se localice fuera de costas, para aprovechar la fuerza mareomotriz-undimotriz del golfo mexicano, y los fuertes vientos del norte que ingresan por esta zona y culminan en la microrregión del Istmo de Tehuantepec. Por otra parte, este desarrollo fuera de costas significaría el primero en México. Estudios realizados por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable, organismo multidisciplinario perteneciente a la UNAM, indica las altas posibilidades del Golfo de México para la generación de energía eólica fuera de costas, la propuesta sería un enorme parque eólico marino con potencial de 600 MW (Eólica, 2020).

A pesar de toda la oferta bioclimática y en la disposición de energías renovables, existente en la región, las principales causas culturales, sociales, educativas o de escasa información, entre otras, que presenta la Región del Istmo de Tehuantepec, podemos enunciar las siguientes:

- Falta de información en la oferta bioclimática para generar un gran potencial en el uso de energías renovables (viento y sol) en las viviendas tradicionales de la región.
- Nulo reconocimiento al enorme valor arquitectónico de la vivienda y el uso de materiales sostenibles y renovables.
- Nula respuesta en la obligatoriedad de las autoridades responsables para implementar políticas públicas con alto valor y armonía con el medio ambiente.

- Desconocimiento de las bondades de la arquitectura bioclimática para una respuesta resiliente ante los fenómenos perturbadores que se presentan en la Región, en especial los sismos.
- Carencia de una cultura social sólida y patrimonial para la construcción de ciudades sostenibles.
- No existe en la Región de una política pública puntual en el uso y aprovechamiento de la energía solar mediante paneles solares para la vivienda tradicional, que ejerza ahorro económico para los cerca de 683 mil habitantes de la región.
- Inexistencia de una cultura de la captación, filtración, aprovechamiento y reutilización del agua de lluvia (poca) pero vital en estos tiempos.
- No existen como tal granjas solares operativas, que influyan drásticamente en el aporte regional de electricidad, generando el MIX energético en la región.
- Incidencia y vorágine de los inversionistas y desarrolladores trasnacionales que no contemplan el rescate arquitectónico ni la sostenibilidad.
- Entre muchas más.

Otra variable causal del por que la region se encuentra al “desnudo” respecto de acciones energeticas, lo constituyen los sismos ocurridos magnitud 8.2 y 7.2 ocurridos en el año 2017 (septiembre) y 2018 (febrero) que afectaron a más de 45 mil viviendas en tan solo la Región del Istmo de Tehuantepec. Por igual el ocurrido en el año 2020 con magnitud 7.4 con epicentro en las costas oaxaqueñas, trajo consigo daños y zozobra, por lo que la reconstrucción continua al momento.

La visión a futuro con la implementación de eficientes políticas públicas, lo constituye el alcanzar los objetivos de la agenda 2030 y en su respuesta ante el covid-19 en las grandes urbes, mencionaremos los que infieren al ámbito arquitectónico actualmente, y no tan solo el número 11 que dice “Ciudades y Comunidades Sostenibles”, el cual busca lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, para ello las líneas transversales de actuación en el ámbito arquitectónico propuestos en función de los Objetivos del Desarrollo Sostenible 2030, son: salud y bienestar, agua limpia y saneamiento, energía Asequible y no contaminante, producción y consumo responsable, vida de ecosistemas terrestres y Alianzas para lograr objetivos. En la Tabla 1, se puntualizan las acciones a incidir desde el punto de vista arquitectónico en beneficio de la Región del Istmo de Tehuantepec.

Luego entonces partiendo de la objetividad y visión en la consecución de metas en beneficio de la Región del Istmo de Tehuantepec; la sociedad en su conjunto debe sumar esfuerzos para exigir cumplimientos en lo inmediato, que satisfagan sus intereses y necesidades. Para ello el mundo científico y tecnológico debe generar sinergias para el aporte de documentos básicos para encaminar los esfuerzos hacia un mejor futuro. La sociedad por sí sola, en este momento crucial que vivimos, es incapaz de inferir por ella misma, el cambio de modalidad en la conceptualización de la defensa

del medio ambiente, por necesidad se requiere de los actores gubernamentales pensantes, inteligentes, con visión, respeto, participación asertiva e inclusión de todos para la mejor toma de decisiones.

Tabla 1. Alienación de los objetivos de la Agenda 2030 con un diseño arquitectónico Sostenible en la Región del Istmo de Tehuantepec.

Objetivo ONU	Desarrollo del Diseño Arquitectónico Sostenible	Objetivo ONU	Desarrollo del Diseño Arquitectónico Sostenible
3. Salud y bienestar - Reducir la tasa mundial de mortalidad materna. - Evitar muertes de recién nacidos y de niños menores de 5 años. - Poner fin a las epidemias del SIDA, tuberculosis, la malaria y las enfermedades tropicales desatendidas y combatir la hepatitis.	Procurar en el DAS, el confort humano y la oportuna zonificación de las áreas de salud de la vivienda, en especial el destinado a la desinfección externa o intramuros.	- Gestionar sosteniblemente el uso eficiente de los recursos naturales - reducir la mitad de desperdicio de alimentos per cápita mundial- - Gestionar la racionalidad ecológica de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida	producción y procesamiento de los residuos sólidos, orgánicos e inorgánicos de la edificación con fines energéticos, además del análisis del ciclo de vida de los materiales, con la aceptación de la economía circular.
6. Agua limpia y saneamiento - Acceso universal y equitativo al agua - Acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados. - Mejorar la calidad del agua, reduciendo la contaminación. - Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores.	Implementar en el DAS, estrategias y acciones en materia de captura, proceso de purificación y rehusó del agua de lluvia tratada, con fines domésticos y de abasto en temporadas de sequía.	15. Vida de ecosistemas terrestres - Asegurar la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y sus servicios. - Promover la puesta en práctica de la gestión sostenible de todos los tipos de bosques. - Luchar contra la desertificación, rehabilitar las tierras y los suelos degradados. - Asegurar la conservación de los ecosistemas montañosos, incluida su diversidad biológica.	Preservar en el DAS, acciones tendientes a la conservación del hábitat y su entorno edificatorio con procesos de renovación, y cuidado del medio ambiente circundante, para la restauración de los ecosistemas, mediante acciones sociales y comunitarias.
7. Energía Asequible y no contaminante - Acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos. - Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas. - Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética	Instrumentar en el DAS, las TBGE Solar y Eólica, además del acceso a todos los programas, iniciativas y ofertas por parte de instancias de gobierno y demás, para la accesibilidad a estas tecnologías limpias.	17. Alianzas para lograr objetivos - Velar que los países desarrollados cumplan plenamente sus compromisos en relación con la asistencia oficial para el desarrollo. - Movilizar recursos financieros adicionales de múltiples fuentes para los países en desarrollo. - Ayudar a los países en desarrollo a lograr la sostenibilidad de la deuda a largo plazo.	Construir un proyecto ciudadano de acuerdos estratégicos que incidan y prioricen el uso de TBGE, así como la defensa del cambio climático, y la toma de decisiones de abajo hacia arriba, por partes de los responsables de políticas públicas a favor del medio ambiente.
12. Producción y consumo responsable Aplicar el marco decenal de programas sobre modalidades de consumo y producción sostenibles.	Instaurar en el DAS, mecanismos de auto consumo humano alimentario, además de incidir mediante procesos automatizados el aprovechamiento,		

Fuente. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>, y su Interpretación propia por Lagunas H; para fines académicos en el DAS. 5 abril de 2021 Consultado: 28 abril de 2023

Si la sociedad conociera a la perfección los beneficios económicos principalmente, y climáticos en segundo orden, con el uso de TBGE inmersos en principios bioclimáticos, promovidos e incentivados por estrategias gubernamentales en diversos programas sociales, sin duda que el incremento en la aceptación de los mismos, sería exponencial. Las condiciones del sitio están dadas y la coyuntura de sucesos y motivos es permanente, por ellos cito las bondades del sitio, que envidiablemente quisieran tener otras latitudes del planeta para un desarrollo pleno y sostenible de sus comunidades, algunas puntualizaciones son:

- La radiación solar total global en la región del Istmo de Tehuantepec es de los 8 027 W/m².
- Las temperaturas alcanzan más de los 45 °C, con una humedad relativa ambiente del 80%, con una radiación solar del orden de los 6.6 kWh/m².

- Las lluvias son moderadas durante la temporada de julio-septiembre, insuficientes para las altas temperaturas de la región, pero benéficas en lo posible para el campo.
- Los vientos alisios, conocidos como “tehuanos” alcanzan velocidades superiores a los 180 km/hora (50m/s).
- La arquitectura tradicional es menor en comparación con la modernidad arquitectónica (gran parte se perdió con los sismos del año 2017 al ser destruidas), pero aún a tiempo para ser rescatable en cuanto a su oferta bioclimática.
- El clima favorece el uso de tecnologías de bajo gasto energético (TBGE) en la vivienda tradicional y la construcción de granjas solares.
- Grandes beneficios económicos y energéticos en la vivienda tradicional con el uso de energías limpias disponibles en la Región.
- Ponderación del diseño arquitectónico bioclimático como una herramienta eficaz, capaz de accionar una planeación asertiva y resiliente en la región.
- Reconversión de la habitabilidad de la vivienda tradicional y su defensa patrimonial.
- Cohesión social y participación comunitaria para el desarrollo Regional con buenas prácticas medioambientales.
- Entre, muchas más.

Para lo anterior se requiere que la política pública que se instrumente en la región, considere no tan solo las variables de “incidencia social” con tan solo acciones de desarrollo en infraestructura física de servicios, por el contrario se busca que la política ambiental o de sostenibilidad en la región, no obedezca nunca al “amago” social y como causa de respuesta, se actúe.

Lo anterior ocurrió con un conflicto social de más de 12 años entre pueblos rivereños del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca; sin energía eléctrica desde hace 10 años a la comunidad, en donde el gobierno del estado de Oaxaca, llevó a cabo la instalación de una granja solar en la población de Santa María del Mar, con una inversión de 45.3 millones de pesos, consistente en 273 paneles solares, con capacidad de hasta 2,072 kW/h, la primera en el estado de Oaxaca para una población de 300 familias. Al momento, dicha granja solar no opera con eficacia, se tiene evidencia de que las placas fotovoltaicas han sido desprendida como consecuencia de los fuertes vientos que soplan en el sitio.

Ante la nula investigación en el uso de la energía solar, tan suficientes en la zona; la pregunta en términos de oportunidades sería ¿la región solo es una fuente de explotación de recursos sin beneficio directo a sus pobladores?, ¿seguirá está conceptualización con la llegada de 10 o más parques industriales? En la figura 15 se muestra la primer planta o granja solar del Istmo de Tehuantepec.



Figura 15. Planta solar en Santa María del Mar, Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

Fuente. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/OTROS/Boletines/boletin?i=2096>. Consultado: 28 abril de 2023

Cuando se tiene todo en materia energética limpia y renovable, se debe incidir en el apropiio de ellas con fines de habitabilidad, generando la implementación y uso de las TBGE en principio, en la vivienda tradicional y posteriormente en resultados multiplicadores en la urbe y su conexión regional, con ello seremos comunidades altamente resilientes y energéticamente sostenibles para el desarrollo humano del presente y el futuro por venir. En materia energética privilegiada, solo debe prevalecer el desarrollo comunitario.

La prospectiva de la región busca que al igual que la captura de energía solar para la generación de electricidad en las viviendas, lo es también la captura de energía eólica (del viento) para la producción de la misma, pero en este caso para los hogares, y que en suma ambas tecnologías (solar y eólica) formen parte de las necesidades satisfactorias en la demanda energética de las viviendas y de procesos de desarrollo sostenible urbano arquitectónicos, que incidan en:

- Incrementar la posibilidad del uso y producción energética con base en las fuentes de energía imperantes en la región (eólica y solar) para el beneficio de la población.
- Sin gran inversión económica, se aprovechen de mejor manera los recursos naturales del sitio en beneficio de la sociedad.
- Con la abundancia del mix energético, se optimiza el desempeño en el uso de la energía solar, generando economía en la población.

- La sociedad se vuelve un vínculo de acción para el desarrollo comunitario y tecnológico para la vida, desarrollando políticas públicas en conjunto con los gobiernos para la visión de futuro sostenible, más cercano y cada vez enormemente dependiente de las energías renovables.

Con esta mira de futuro, la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México; debe incursionar en el desarrollo sostenible medioambiental, de competencia económica y lo más importante, adaptarse a las condiciones del cambio climático, para un sano desarrollo. En la figura 16 se concibe una prospectiva energética en convivencia con las energías limpias de la región.



Figura 16. Prospectiva energética para el Istmo de Tehuantepec, Oaxaca.

Fuente. Concepción propia para fines académicos. Consultado: 28 mayo 2023.

La Región ha enfrentado en los últimos 6 años, situaciones que se desconocían y que jamás de imaginaron sucedería en la misma, muchos de los estragos que causan los fenómenos naturales, en gran medida se ven multiplicados en daños, en razón de nuestra vulnerabilidad edificatoria, y procesos constructivos, además de los de ubicación y sitio del desarrollo de la vivienda, en muchas ocasiones están se edifican en lugares de alto riesgo y vulnerabilidad climática. Tan solo pensemos en una variable drástica en el comportamiento “normal” de los vientos, y sus efectos devastadores sobre la humanidad, y ya ni hablar de lo ocurrido con los sismos, que aún no permite la superación del fenómeno entre los habitantes de la región. La vivienda tradicional luego entonces y la misma ciudad, forman la simbiosis necesaria para la sostenibilidad y resiliencia, la vivienda es la primera célula que impulsa el todo, y se considera

de alta influencia en las células urbanas sostenibles, ya que el DAS bioclimático al ponderar los recursos energéticos mediante el uso de TBGE desde la misma, y sus manzanas multiplicadoras (células urbanas) conlleva al diseño de una ciudad o localidad energéticamente sostenible, con granjas solares, parques eólicos para uso de la comunidad, y como su consecuencia energética, el uso de está, en la movilidad urbana de las personas, en beneficio de sus ingresos, con fines de mercado y atracción turística, al ser considera la urbe, ciudad o localidad como una ciudad limpia en el uso y disposición de energías renovables.

Hoy día todas las ciudades en el mundo que han optado por el uso del 100% de energías limpias en sus ciudades, además de usar vehículos eléctricos y otros de baja emisión contaminante, tratamiento de aguas para su rehúso, captura y almacenaje de agua de lluvia, renovación de las ciudades del ayer, recuperación del espacio público, corredores “verdes”, edificaciones cero carbón, etcétera; son altamente sostenibles y resilientes.

Estas ciudades no se crearon ayer, ni son nuevos desarrollos urbanísticos, son ciudades que hace 30 años entendieron la necesidad de dejar de contaminar el medio ambiente, su capacidad científica y tecnológica los ha posicionado en el ranking número uno, con la creación de turbinas para aerogeneradores cada vez más modernas y efectivas, construcción de granjas solares, tanto en tierra como en ríos, hoy por igual invierten grandes capitales en desarrollo de energía mareomotriz o undimotriz, proveniente de aerogeneradores puestos fuera de costa, que son capaces de uno solo de 14 MW, generar electricidad para 6 mil hogares.

Los vientos y el sol serán cada vez más incesantes en el futuro, estos elementos son los que la vivienda tradicional y las edificaciones en general deberán enfrentar y administrar en su beneficio, mediante las TBGE que la arquitectura bioclimática proponga en conjunto con las estrategias de confort térmico al interior de ellas.

Cada vez se reportan vientos más fuertes, de ahí la innovación en el uso de aerogeneradores más potentes en la mar, pero igualmente habría que hacer una pausa en esta eufórica busca de la energía limpia, por igual debemos pensar en la limpieza de los mares, es un elemento natural que muy poco se habla, tan solo para hacer referencia del plástico en los peces, pero las enormes cantidades de sustancias del transporte marítimo (el sexto generador de GEI), ¿qué daños causarán?

La vivienda tradicional y su fortaleza ante el cambio climático mediante la intervención de la arquitectura bioclimática, genera fortalezas energéticas en la comunidad, con altos beneficios económicos y ambientales, además esta misma a nivel urbano crea la satisfactores necesarios en la alta demanda de servicios y energía de la ciudad, que la hacen caótica; al grado de que no hay ya tiempo para hacer nuevas ciudades con valores climáticos y energéticos, si no por el contrario con el crecimiento de estas, tan solo queda la mitigación de los necesidades energéticas, mediante el aporte de TBGE y el puntual estudio de la arquitectura bioclimática. Toda la energía que se

logre capturar y almacenar por sí sola, ya forma parte de la resiliencia urbana, que se debe reponer día con día, y que, ante situaciones externas, expone sus grandes carencias en valores energéticos limpios.

Por ello, la resiliencia de la región la englobamos en la innovación de TBGE en la vivienda tradicional de la Región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca. En ese tenor de conceptos e ideas, presento un análisis bioclimático de la resiliencia energética en la vivienda, en función de una vivienda tradicional existente, donde la inclusión sostenible parte desde la conceptualización arquitectónica prevalente y su incorporación para mejora energética en función del desempeño higrotérmico de la misma.

El uso de TBGE (Tecnologías de Bajo Gasto Energético) y la innovación como primicia son mostradas en la figura 17, donde el modelo arquitectónico sostenible es sustentado en función de la efectividad y ahorro económico. No se trata solo de colocar paneles solares, se trata de resolver desde el punto de vista arquitectónico, una respuesta urbana eficiente para el conjunto del núcleo urbano, entendiéndose este, como la comunidad en general.

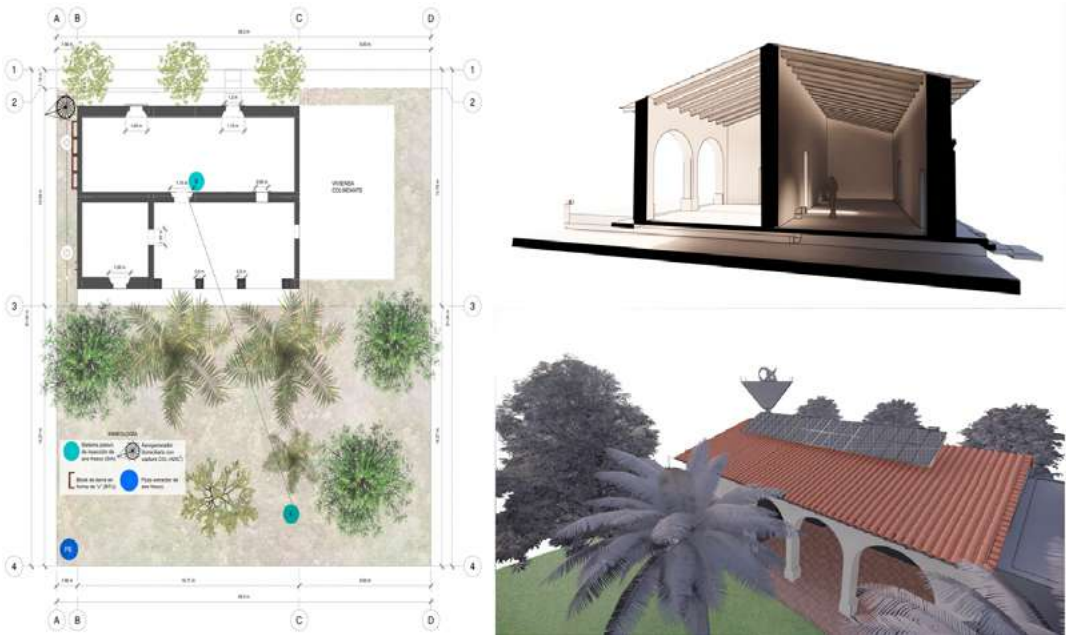


Figura 17. Modelo urbano arquitectónico de la vivienda tradicional de la región del Istmo de Tehuantepec.

Fuente: Desarrollo arquitectónico sostenible propio con fines académicos Consultado: 28 mayo 2023.

El proceso de análisis y experimentación en su caso de cada estrategia bioclimática aplicada dependerá del sentido en la búsqueda de herramientas ya probadas en eficiencia y desempeño energético, otras son propuestas, las cuales constituyen un principio de innovación en la búsqueda de estrategias bioclimáticas adaptativas a la región de cada lugar con cero emisiones de carbono. El desarrollo de resultados dependerá de los procesos de medición y experimentación a mayor escala de resul-

tados, propiciando un nicho de oportunidades para otras ciencias y ramas del conocimiento científico, y a futuras investigaciones. Los resultados en materia de estrategias bioclimáticas son mostrados en la figura 18.



Figura 18. Modelo del sistema térmico de fachada ventilada para ahorro energético “BTU”.

Fuente. Desarrollo arquitectónico sostenible propio con fines académicos. Consultado: 28 abril de 2023.

La propuesta “BTU” está inmersa en el principio térmico que produce la cama de aire y el uso de la tierra. La columna (chimenea) formada por el “BTU” a las alturas adecuadas logrará generar la conducción de la entrada de aire fresco al interior de la edificación y está a su vez expulsará el aire caliente del interior al exterior de la edificación, disminuyendo la temperatura y humedad relativa, consiguiendo:

- Control de la temperatura.
- Renovación y suministro de aire fresco.
- Retardo térmico.
- Confort térmico.

La práctica desarrollada para su ejemplificación, constituyo una gran satisfacción, siendo esta probada en modelos teóricos *in situ*, tan solo en espera en el tiempo, de los resultados propuestos. En la figura 19 se muestra el desarrollo del modelo.



Figura 19. Modelo del sistema térmico de fachada ventilada para ahorro energético “BTU”.

Fuente: Desarrollo Arquitectónico sostenible propio con fines académicos. Consultado: 28 mayo 2023.

Lo sencillo de la forma conlleva intrínseco el valor de lo original. El sistema es altamente flexible, por su característica de eficiencia energética el “BTU” genera economía y ahorro energético. EL “BTU” es un proyecto sostenible que genera sustentabilidad en el desarrollo humano y social, en la ecología y el cuidado del medio ambiente.

El “BTU” genera un campo de oportunidades a nivel regional, logrando cadenas de alto valor productivo, entre las más importantes están la generación de empleos a baja escala en la fabricación del “BTU”, economía solidaria (conjunto de acciones en comunidad), generando una riqueza moderada producto del ahorro energético.

En otro nivel de escala económica la tecnificación y la industrialización del producto “BTU” garantiza la generación de riqueza, ya que el nicho de oportunidad de estrategias bioclimáticas es mundial. Igualmente, el “BTU” garantiza el principio térmico de confort pasivo buscado en las viviendas tradicionales de la región, mediante técnicas y estrategias asequibles, de fácil elaboración, renovables y menos contaminantes al medio ambiente. Por igual el “BTU” genera comunidad, al hacer partícipe a la sociedad en su conjunto, de un nuevo modelo de cultura ecológica, en el cual se implementen las estrategias adecuadas para el confort térmico de las viviendas, en función de su respuesta térmica ante las inclemencias del clima prevaleciente.

Otros modelos de innovación propuesto consisten en la captura de CO² con fines de uso en la agricultura y jardinería. Los altos niveles de CO² obligan a que desde el propio hogar se generen las acciones puntuales para disminuir su efecto. Al igual que el “BTU” el modelo llamado “ACD2” se concibe como parte integrante del Modelo Arquitectónico Sostenible de la Región. Cual toda innovación, no basta mencionar que estas aportaciones se encuentran protegidas por los derechos de autor y propiedad intelectual, y en el presente trabajo, solo son mostradas en su conceptualización teórica, sin llegar a los resultados finales, en virtud que estos se encuentran en etapa de diseño. En la figura 20, se muestra el modelo “ACD2”.

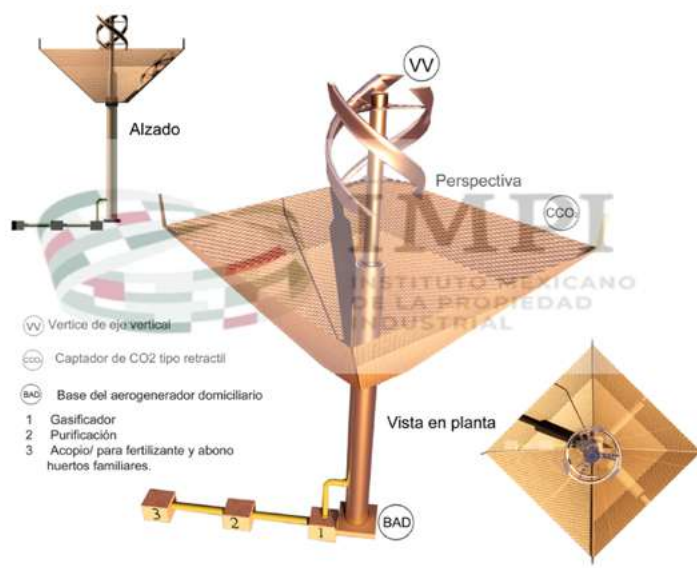


Figura 20. Modelo de Innovación “ACD2 para captura de CO² y generación de energía.

Fuente. Desarrollo Arquitectónico sostenible propio con fines académicos. Consultado: 28 abril de 2023.

Discusión

En materia de sostenibilidad, los inconvenientes se ciernen a la toma de decisiones puntuales en materia de energías limpias y renovables, no hace falta profundizar mucho, para entender que los cambios climáticos, así como la incidencia cada vez más repetitiva de enfermedades y pandemias que aún desde el punto de vista científico solo atinamos a entender las coincidencias sin llegar a conclusiones precisas en razón de su incidencia y periodicidad.

Entender que somos tan solo seres vivos en este planeta, nos ayudará mucho a comprender que estamos indefensos ante los cambios climáticos y sus repercusiones en la salud, la duda, sobre si en el futuro tendemos presentes más enfermedades letales, es muy alto y probable. Actualmente superamos los 8000 millones de personas, este

mundo ya no supera la dos veces su demanda energética global. El aumento de la población no parece frenarse, la migración es cada vez más motivante, la industrialización no cesa en su perspectiva del logro económico a cambio del deterioro industrial.

Entender que, desde la industrialización, hace ya 221 años basada en el uso del carbón mineral (Revolución industrial); que ha generado al momento, el incremento en el índice de temperatura media global del planeta Tierra en 1.5 °C (IPCC, 2019) y de esta en los últimos 66 años, ha inferido la aparición de grandes enfermedades y pandemias sumada con el comportamiento en el cambio solar (ciclos solares) no requiere entender más que una sola conceptualización; el freno a la contaminación del planeta. Hablar del fenómeno de la natalidad mundial es ríspido y quizás jamás entenderemos que la suficiencia energética del planeta está rebasada, a lo mejor solo entendamos que el planeta es muy grande para todos.

Desarrollos logísticos comerciales como el planteado en el corredor interoceánico del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México; siempre deberán ser discutidos y analizados a profundidad, más cuando los beneficios de desarrollo solo son de manera específica y no global, luego entonces se requiere de acuerdos sociales en beneficio de la colectividad, si se incide en el desarrollo global, por igual se debe provocar el beneficio de todos y dar el salto cuántico a lo de hoy, la sostenibilidad energética para el desarrollo sostenible. Es impensable que zonas generadoras de alta energía eólica y solar, no sean en beneficio de la población residente en el sitio.

La conciliación más asertiva debe ser con las entidades gubernamentales, quienes deben satisfacer los requerimientos de la sociedad, pensar en el futuro sostenible, es pensar en la salvaguarda del hábitat, que alberga toda actividad humana y debe prevalecer por el transcurrir del tiempo. En el tema de las innovaciones con fines bioclimáticos y de sostenibilidad, pueden existir invariabilidad de opiniones y discusiones, pero la más imperiosa debe ser el atreverse a crear por el bien común, a imaginar y concebir un mundo resiliente capaz de enfrentar todas las adversidades sociales, climáticas y extraordinarias, que tan solo por ser humanos, nos seguirán afectando en el futuro.

Conclusiones

En términos de salud global insistimos en consolidar la incidencia de enfermedades y pandemias producto del calentamiento global desarrollado en los últimos 66 años de la era industrial, y la disminución de las manchas solares en cada ciclo solar, debe preocupar y ocupar, puesto esta situación se da de manera coincidente en la aparición de afectaciones en la salud de los humanos. Cada ciclo solar que contempla 11 años en promedio, tenderá cada uno de ellos a ser considerando de manera continua como los más calurosos, en razón por igual de la permanencia de la emisión de GEI presentes

en la atmósfera, y que estos no podrán ser disminuidos, por lo menos en el futuro cercano. La relación de manchas solares con la salud es una oportunidad de exploración con fines científicos, para poder correlacionar dichos fenómenos y estar en posición de incidir en la toma de decisiones o prevenciones a futuro.

Desarrollos logísticos tan prioritarios e insistentes como lo es el corredor interoceánico del Istmo de Tehuantepec, con lleva una gran responsabilidad regional, que infiere el bienestar de 2.4 millones de habitantes, insisto, no debemos ser tan solo espectadores del desarrollo tecnológico y de oferta laboral, debemos incluir esta gran oportunidad de desarrollo, con el objetivo de una visión globalizadora regional, donde por igual de los beneficios económicos directos, por igual los satisfactorios medioambientales en función de lo que la naturaleza oferta, la cual es altamente incisiva en cuanto a energía eólica y solar, sea en beneficios de todos los ciudadanos, es decir, debemos crecer de la mano con la modernidad para constituir una enorme región resiliente y adaptativa a los cambios climáticos y fenómenos perturbadores presentes, en especial los sismos.

Por otra parte, la búsqueda incesante del confort higrotérmico que favorezca al ser humano en una edificación y/o espacio en general, ha sido el objetivo más apremiante a lograr en términos arquitecturales y medio ambientales durante largo tiempo; en muchas ocasiones el aprendizaje a surgido de grandes cambios climáticos en el planeta Tierra. Igualmente, derivado de factores de salud global y últimamente producto del desarrollo tecnológico humano con la llamada Revolución industrial, donde los esfuerzos de los iniciadores del uso de la energía solar con fines bioclimáticos fueron obviados y olvidados para dar paso al objeto mecanizado capaz de producir cualquier masa, para cualquier uso, incluso con la ayuda de la IA; todo en función de la satisfacción de calor o enfriamiento, principales necesidades bioclimáticas del ser humano.

Actualmente los alcances de estos planteamientos, se ven realizados en las nuevas propuestas de diseño arquitectónico bioclimático en todo el mundo, pero especialmente en Europa; donde la concepción de una arquitectura verde obligatoria mediante leyes y compromisos medioambientales, es una realidad. Los edificios definidos como cero emisores de carbonos o verdes, certificados por los reguladores ambientales de cada país, forman parte ya, de la arquitectura con energía cero en el mundo europeo.

Para el caso mexicano, apenas hace 30 años y mediante la educación profesional en instituciones educativas nacionales, se ha incursionado en el tema bioclimático, sin embargo, aún la arquitectura bioclimática en México es un reto permanente, más cuando las políticas públicas son discutibles en el sentido de que si el uso de energías renovables, es imperiosamente necesario.

En el estado de Oaxaca, por igual el tema de una arquitectura bioclimática es nuevo, sin embargo, el estado contiene una enorme riqueza arquitectónica tradicional, que ha servido de ejemplo para múltiples interpretaciones energéticas. Para entender los procesos dinámicos de una arquitectura bioclimática eficiente y resiliente, la búsqueda empieza en conocer en primer orden, que es la energía, cuales son sus inercias y

que fenómenos físicos inciden en ella, que provocan respuestas oportunas en la construcción del universo y a nosotros mismos, en un entorno equilibrado en términos biológicos.

Lo anterior, define la importancia entonces de entender los diferentes mecanismos que la naturaleza desarrolla en su proceso evolutivo, donde los seres humanos, lo transformamos todo en nuestro beneficio. En dicha transformación, el uso de la energía primordial que incide para todo, es la que proviene de los rayos electromagnéticos del Sol, es la única fuente renovable gratuita que el fenómeno físico ambiental ofrece a toda la vida en el planeta Tierra y quizás en otras dimensiones universales del sistema planetario. El uso de la energía solar deriva en múltiples aplicaciones, siendo la más importante, la obtención de la energía eléctrica con fines de calefacción y enfriamiento. El proceso se realiza mediante las TBGE, que son capaces de capturar la radiación solar incidente en determinado lugar.

Como consecuencia del fenómeno radiante del Sol, la fuerza del viento existe, la cual en los últimos 20 años ha tenido un “boom” energético en nuestro país, principalmente en la región del Istmo de Tehuantepec, considerada la número uno como fuente energética limpia en la república mexicana. Sin embargo, los beneficios no son directos para la comunidad ni mucho menos en beneficio de una vivienda bioclimática.

Por lo anterior, el trabajo realizado obedece a lo disímulo entre la implementación de estrategias de desarrollo logístico, con fines comerciales y el análisis regional climático con la enorme oferta climática, fundada en el uso de la energía solar y la energía eólica, ambas con una fuerte presencia en el sitio, lo que la hace único y especial a nivel mundial, para estar en conjunto inmersos en el mix energético y desarrollo sostenible.

Las propuestas innovadoras por igual constituyen el aporte al quehacer arquitectónico y forman parte de la inventiva en beneficio de la colectividad y de la humanidad, las propuestas tenderán al desarrollo experimental en otras etapas de mejora y obtención de resultados, sin embargo, la teorización de las mismas constituye el elemento científico a buscar. El uso del aerogenerador domiciliario ADC2, capaz de generar electricidad para el mix energético de la vivienda tradicional y capturar el CO² presente en la atmósfera, está inmerso en la iniciativa mundial en la búsqueda de tecnologías limpias capaces de generar la disminución de los gases de efecto invernadero, en este caso uno de los más perjudiciales, el dióxido de carbono.

Los beneficios son prometedores en materia ambiental, ya que si el resultado final es favorable, cada vivienda en el mundo, puede cooperar con la disminución de gases de efecto invernadero y obtener electricidad al mismo tiempo. Otra innovación donde se alcanza el tema experimental demostró que el sistema térmico de fachada ventilada para ahorro energético “BTU”, es viable; su resultado solamente esta en función de la implementación en el sitio y su medición de variables en la temporalidad. El proceso teórico y experimental alcanzado es satisfactorio. El resultado final será un sistema asequible y operacionalmente funcional.

Referencias

- Arroyo, L. (2021). EE UU anuncia una inversión de 130 millones para la reforma laboral en México tras la reunión de Harris y López Obrador. <https://elpais.com/mexico/2021-06-08/kamala-harris-y-lopez-obrador-se-comprometen-a-mejorar-las-condiciones-en-centroamerica-para-frenar-la-migracion.html>
- Atresmedia (2020). El 2020, ¿el año más cálido desde 1880?: la anomalía que ha provocado un calor excesivo en gran parte de la Tierra. https://www.lasexta.com/noticias/ciencia-tecnologia/2020-ano-mas-calido-1880-anomalia-que-provocado-calor-excesivo-gran-parte-tierra_202005215ec6c2f6ea9d4700011a593f.html
- Change, N. G. (2020). NASA Global Climate Change. https://climate.nasa.gov/blog/2953/there-is-no-impending-mini-ice-age/como-sera-ciclo-solar-25cuatro-anos-fueron-mas-calurosos-constancia-201901091240_noticia.html
- D O F (2 0 2 0) . S E G O B . https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5597712&fecha=04/08/2020
- E-Consulta (2017). Reactivan proyecto de parque eólico que amenaza humedales en Alvarado. <http://www.e-veracruz.mx/nota/2017-12-23/ecologia/reactivan-proyecto-de-parque-eolico-que-amenaza-humedales-en-alvarado-en-marzo.html>
- Eólica (2020). La energía eólica marina con 600 MW en el Golfo de México generaría 4.470 empleos. <https://www.evwind.com/2020/05/05/la-energia-eolica-marina-con-600-mw-en-el-golfo-de-mexico-generaria-4-470-empleos/ferroviario/2020/06/08/corredor-interoceanico-istmo-operaria-2023>
- Fiona, H. (2020). ECOPORTAL. <https://www.ecoportal.net/paises/co2-aumenta-a-pesar-de-covid/>
- IPCC (2019). Calentamiento global de 1,5 °C. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_spanish.pdf
- LABC (2018). ABC cambio. <https://www.abc.es/natural/cambioclimatico/abci-ultimos->
- León, F.M. (2023). Tiempo.com. <https://www.tiempo.com/ram/ciclo-solar-25-intenso->
- Machuca, L. (2009). "Proyectos oficiales y modos locales de uso del Istmo de Tehuantepec en la época colonial: historias de sencuentros". El istmo mexicano: una región inasequible, editado por Emilia Velázquez et al., IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.19332>
- Mellado, M. M. (2016). Los rayos cósmicos, las energías mas extremas del universo. España: RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales.

- México, G. D. (2020). Comunicado No. 012. Presentación del estudio del Plan Estratégico y Plan Maestro Conceptual para apoyar la instrumentación del Programa Istmo. <https://www.gob.mx/ciit/prensa/comunicado-no-012-presentacion-del-estudio-del-plan-estrategico-y-plan-maestro-conceptual-para-apoyar-la-instrumentacion-del-programa-istmo-259586280>
- México, P. (2019). Macroproyecto. https://www.proyectosmexico.gob.mx/proyecto_inversion/programa-para-el-desarrollo-del-istmo-de-tehuantepec-pdit/
- MX, G. (2020). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/geotermia-fuente-de-energia-renovable>
- Otaola A Javier. et al. (2017). El Sol y la Tierra. Una relación tormentosa. México: Fondo de Cultura Económica.
- Redaccion (2019). "Cambio climático: cómo era la Tierra cuando había tanto CO2 en la atmósfera como ahora". BBC.com. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-50563893>
- Segob (2020). DOF.GOB.MX. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5597712&fecha=04/08/2020
- T21 (2020). Corredor Interoceánico del Istmo operaría en 2023. <http://t21.com.mx/>
- Tran, L. (2020). ¿Cómo será el ciclo solar 25?. <https://ciencia.nasa.gov/>
- Viñas, M. J. (2023). "NASA: El verano de 2023 es el más caluroso en el registro". nasa.gov. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-el-verano-de-2023-es-el-m%C3%A1s-caluroso-en-el-registro/>
- Wikipedia (2023). "Anexo: Ciclos solares". Wikipedia, La enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Anexo:Ciclos_solares&oldid=160065817.
- Wikipedia (2020). "Anexo: Cronología de epidemias". Wikipedia, La enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Anexo:Cronolog%C3%ADa_de_epidemias&oldid=160243336.

***Arquitectura, Sostenibilidad, Resiliencia y Salud. Hacia una
Sociedad en Armonía con el Medio Ambiente***

***Architecture, Sustainability, Resilience and Health. Towards a
Society in Harmony with the Environment***

Se terminó de imprimir en el mes de xxx de 2024, en los talleres de xxx, en la Ciudad de México. Se utilizó la familia tipográfica Lato. Los interiores están impresos en papel xxx de xxx g. Se tiraron xxx ejemplares.

En este libro se analizan y presentan proyectos de Diseño Bioclimático Sostenible y Resiliente, enfocados a lograr condiciones de confort ambiental integral en los ocupantes de edificios y se integran sistemas sostenibles con base en el aprovechamiento de las energías renovables para el ahorro y uso eficiente de la energía en el hábitat. Ejemplos de estas acciones se presentan en este libro con los trabajos de investigadores que forman parte de la Red LINGGLOBAL. Estas acciones son aplicables tanto a nuevos proyectos como a proyectos existentes para optimizar su comportamiento, en un enfoque dinámico y evolutivo de resiliencia. Así mismo, se plantean las alternativas y estrategias más idóneas para mitigar el Cambio Climático y mejorar el medio ambiente, la economía, la calidad de vida y la salud de los ocupantes en los espacios arquitectónicos donde realizan sus diversas actividades, al igual que en el exterior en los entornos urbanos.

This book analyses and presents Sustainable and Resilient Bioclimatic Design projects, focused on achieving integral environmental comfort conditions for building occupants and integrating sustainable systems based on using renewable energies for the saving and efficient use of energy in the habitat. Examples of these actions are presented in this book with the work of researchers who are part of the LINGGLOBAL Network. These actions apply to new and existing projects to optimize their performance, in a dynamic and progressive approach to resilience. It also proposes the most suitable alternatives and strategies to mitigate Climate Change and improve the environment, the economy, the quality of life, and the health of the occupants in the architectural spaces where they carry out their various activities and outside in urban environments.

José Roberto García Chávez

