



GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE HUMEDAD AMBIENTAL

Autor: Blanca Méndez Mateo

Director: Juan Norberto Moriñigo

Madrid, España.

Junio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
“Análisis energético y comparativo de los sistemas de recuperación de humedad
ambiental”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Blanca Méndez Mateo

Fecha://

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo

Fecha://

DE NORVERTO
MORIÑIGO JUAN -
09746499L

Firmado digitalmente por DE
NORVERTO MORIÑIGO JUAN -
09746499L
Fecha: 2025.07.02 15:33:21 +02'00'

ANÁLISIS ENERGÉTICO Y COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA

Autor: Méndez Mateo, Blanca.

Director: Norberto Morínigo, Juan.

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia de Comillas.

RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto contiene un estudio técnico y económico de un sistema de recuperación de agua a partir de la humedad ambiental, situado en el Desierto de Tabernas, en Almería, España. Con una inversión inicial estimada de 121.555€ y una vida útil de 15 años.

1. INTRODUCCIÓN

La creciente problemática global de la escasez hídrica, debido al aumento de demanda y potenciada por el cambio climático, exigen nuevos desarrollos de fuentes de producción de agua no tradicionales y que sean a su vez sostenibles. Este proyecto se enfoca en la búsqueda de soluciones enfocadas en la recuperación del agua proveniente de la humedad ambiental. La zona elegida como foco del análisis es el Desierto de Tabernas ubicado en Almería, Andalucía, ubicado en las coordenadas (Latitud: 37°05'28''N - Longitud: 02°18'08''W), el motivo por el cual se ha escogido esta zona es por sus condiciones extremas y singularidad climática, convirtiéndola en el único desierto propiamente dicho de Europa y, por tanto, en un ambiente excepcional para la puesta en marcha del proyecto que busca mitigar el estrés hídrico en zonas áridas. Se han seguido una serie de normativas y criterios que posicionan el sistema como sostenible y alineado con la propuesta del proyecto 2030.

2. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio técnico, económico y comparativo de las diferentes técnicas de recuperación de humedad ambiental existentes, con un enfoque específico en su aplicación en el Desierto de Tabernas.

Para ello, se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva de tecnologías existentes, un análisis con la ayuda de Python de los datos meteorológicos para caracterizar el emplazamiento del sistema, la selección del método más conveniente dadas las condiciones

en la región, el dimensionamiento conceptual de un prototipo; un detallado análisis de costes basado tanto en la inversión inicial, como en los costes operativos, para poder calcular el coste nivelado del agua; un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del sistema propuesto, la identificación de posibles riesgos y sus mitigaciones y finalmente, el estudio del marco normativo.

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Tras llevar a cabo un análisis comparativo entre todas las técnicas posibles, el modelo seleccionado por su mayor compatibilidad con las condiciones del Desierto de Tabernas ha sido un modelo híbrido de desecantes-condensador, el cual, ha sido optimizado para operar eficientemente bajo humedades relativas moderadas con alta radiación solar.

Para alcanzar la producción diaria de 150 litros, se requiere de un diseño de 100 m² de colectores solares térmicos, con una propuesta de modelado que incluye un ciclo de absorción conformado por desecantes sólidos, un ciclo de desorción, mediante calentamiento cuya energía proviene de colectores solares de tubos de vacío, un ciclo de condensación activa, el cual será alimentado mediante energía solar fotovoltaica y, por último, un tanque de almacenamiento en el que el agua será filtrado mediante UV para garantizar la potabilidad de la misma.

Para el análisis financiero se han evaluado tanto los gastos de inversión inicial, como los gastos operativos y suponiendo una vida útil de 20 años. A partir de ahí se ha calculado el coste del agua nivelado, para así poder compararlo con otras técnicas de obtención de recursos hídricos actuales en la región para evaluar su viabilidad.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el estudio de la implantación de un modelo híbrido desecante-condensador en el Desierto de Tabernas, son los siguientes:

- La integración de desecantes para el ciclo de absorción y la condensación activa permite operar al sistema eficazmente incluso con humedades relativas moderadas, ventaja competitiva frente a los sistemas pasivos que requieren condiciones muy exigentes.
- La sinergia entre la energía solar térmica para la regeneración y la energía fotovoltaica para el condensador asegura una producción constante y optimizada, demostrando que puede llegar a satisfacer las necesidades de pequeños

asentamientos. Añadido a ello, esto conlleva una huella de carbono prácticamente nula.

- Con los cálculos realizados, se ha estimado un CAPEX (inversión inicial) de 121.555€ y OPEX (gastos operativos) de 32.500€, los cuales han sido proyectados para una vida de 15 años, lo cual nos da un LCOW (coste de agua nivelado) de 0,18758 €/L. Valor ligeramente superior a los métodos de transporte de agua convencionales, sin embargo, nos ofrece una resiliencia y autonomía crucial para hacer frente a épocas climatológicas extremas o fluctuaciones económicas en el sector hídrico tradicional.

5. CONCLUSIONES

El presente proyecto demuestra la viabilidad tanto técnica como económica a largo plazo de la producción autónoma de agua mediante la recolección de la humedad ambiental atmosférica en zonas áridas como es el Desierto de Tabernas. El modelo híbrido desecante-condensador alimentado con energía renovable ofrece una solución sostenible y resiliente para abordar la escasez hídrica, posicionándolo como una alternativa competitiva para abordar el cambio climático. Adicionalmente del coste del agua nivelada, que ya hace rentable su implantación, su autonomía hídrica y el impacto ambiental positivo que supone, justifican plenamente su implantación.

Este modelo planteado es escalable a gran escala, ofreciendo la base a la solución que acarrean muchas otras zonas áridas, con condiciones climatológicas similares, que sufren de estrés hídrico, contribuyendo significativamente a la agenda 2030 europea para la gestión sostenible del medio ambiente.

ENERGETIC AND COMPARATIVE ANALYSIS OF RELATIVE HUMIDITY RECOVERY SYSTEMS

Author: Méndez Mateo, Blanca.

Supervisor: Norberto Morínigo, Juan.

Collaborating Entity: ICAI - Universidad Pontificia de Comillas.

ABSTRACT

This project presents a technical and economic study of an atmospheric water recovery system, located in the Tabernas Desert, Almería, Spain. The system entails an estimated initial investment of €121.555 and boasts an operational lifespan of 15 years.

1-INTRODUCTION

The escalating global challenge of water scarcity, driven by increasing demand and exacerbated by climate change, necessitates the development of novel and sustainable non-traditional water sources. This project focuses on identifying solutions for water recovery from atmospheric humidity. The Tabernas Desert in Almería, Andalusia, Spain (Latitude: 37°05'28''N - Longitude: 02°18'08''W), was selected as the primary analytical focus due to its extreme conditions and unique climate, making it the only true desert in Europe. Consequently, it presents an exceptional environment for the implementation of a project aimed at mitigating water stress in arid regions. A series of regulations and criteria have been adhered to, positioning the proposed system as sustainable and aligned with the objectives of the 2030 Agenda.

2-PROJECT DEFINITION

The primary objective of this work is to conduct a comprehensive technical, economic, and comparative study of various existing atmospheric humidity recovery techniques, with a specific focus on their application in the Tabernas Desert. To achieve this, an exhaustive investigation of current technologies was undertaken, followed by an analysis of meteorological data, aided by Python, to characterize the system's proposed location. This informed the selection of the most suitable method given the regional conditions, leading to the conceptual dimensioning of a prototype. Furthermore, a detailed cost analysis, encompassing both initial investment and operational expenses, was carried out to calculate the Levelized Cost of Water (LCOW). The study also includes a sensitivity analysis to assess the robustness of the proposed system, the identification of potential risks and their mitigation strategies, and finally, a review of the relevant regulatory framework.

3-MODEL DESCRIPTION

Following a comparative analysis of all feasible techniques, the model selected for its superior compatibility with the Tabernas Desert conditions is a hybrid desiccant-condenser system. This model has been optimized to operate efficiently under moderate relative humidity levels coupled with high solar radiation.

To achieve a daily production of 150 liters, the design requires 100 m² of solar thermal collectors. The proposed modeling includes an absorption cycle utilizing solid desiccants, a desorption cycle (regeneration) driven by heat energy from evacuated tube solar collectors, an active condensation cycle powered by photovoltaic solar energy, and finally, a storage tank where the collected water is UV-filtered to ensure its potability.

For the financial analysis, both initial investment expenses and operational costs have been evaluated, assuming an operational lifespan of 20 years. Based on these figures, the Levelized Cost of Water (LCOW) has been calculated to enable comparison with other current water resource acquisition techniques in the region and assess its overall viability.

4-RESULTS

The results obtained from the study on the implementation of a hybrid desiccant-condenser model in the Tabernas Desert are as follows:

- The integration of desiccants for the absorption cycle with active condensation enables the system to operate efficiently even under moderate relative humidity conditions, presenting a competitive advantage over passive systems that demand highly stringent environmental parameters.
- The synergy between solar thermal energy for regeneration and photovoltaic energy for the condenser ensures consistent and optimized production, demonstrating its capacity to meet the needs of small settlements. Furthermore, this configuration results in a virtually negligible carbon footprint.
- Based on the conducted calculations, an estimated CAPEX (initial investment) of €121.555 and OPEX (operational expenses) of €32.500 have been projected over a 15-year lifespan. This yields a Levelized Cost of Water (LCOW) of 0,18758 €/L. Although this value is slightly higher than conventional water transportation methods, it crucially offers resilience and autonomy to cope with extreme climatological periods or economic fluctuations within the traditional water sector.

5-CONCLUSIONS

This project demonstrates the long-term technical and economic viability of autonomous water production through the collection of atmospheric humidity in arid zones such as the Tabernas Desert. The hybrid desiccant-condenser model, powered by renewable energy, offers a sustainable and resilient solution to address water scarcity, positioning it as a competitive alternative for climate change mitigation. Beyond the Levelized Cost of Water (LCOW), which already renders its implementation cost-effective, its water autonomy and positive environmental impact fully justify its deployment. This proposed model is scalable for large-scale application, providing a foundational solution for numerous other arid regions worldwide suffering from water stress under similar climatic conditions, thereby contributing significantly to the European 2030 Agenda for sustainable environmental management.

Índice de la memoria

Capítulo 1. RESUMEN EJECUTIVO.....	6
Capítulo 2. INTRODUCCIÓN.....	8
2.1 CONTEXTO	8
2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	9
2.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS).....	10
2.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO	11
2.4.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL	12
2.4.2 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS RELEVANTES	12
2.4.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN ZONAS DE SEQUÍA	12
2.4.4 PLAN DE IMPLEMENTACIÓN.....	13
2.5 RECURSOS QUE EMPLEAR	13
Capítulo 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
3.1 DEFINICIONES BÁSICAS.....	15
3.1.1 HUMEDAD ABSOLUTA [HA]	15
3.1.2 HUMEDAD RELATIVA [HR].....	15
3.1.3 PUNTO DE ROCÍO	16
3.1.4 CICLO DE RANKINE	16
3.2 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE HUMEDAD AMBIENTAL	18
3.2.1 ATRAPANIEBLAS.....	19
3.2.2 CONDENSACIÓN RADIATIVA PASIVA.....	20
3.2.3 POZOS DE ROCÍO	22
3.2.4 SISTEMAS DE MEMBRANAS.....	23
3.2.5 GENERADORES DE AGUA ATMOSFÉRICA.....	24
3.2.6 DESECANTES.....	26
3.2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS.....	27
3.2.8 TABLA COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE HUMEDAD ATMOSFÉRICA:	30
Capítulo 4. METODOLOGÍA.....	31
4.1 CRITERIOS DE COMPARACIÓN.....	31

4.1.1 PRODUCCIÓN DE AGUA TEÓRICA POR METRO CUADRADO	31
4.1.2 TABLA COMPARATIVA TÉCNICAS.....	41
Capítulo 5. ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO	42
5.1.1 EL DESIERTO DE TABERNAS, (ALMERÍA, ANDALUCÍA).	42
5.1.2 PARÁMETROS INCLUIDOS EN EL ESTUDIO.....	43
5.1.3 DATOS DE SIAR.....	44
Capítulo 6. SISTEMA ESCOGIDO PARA IMPLANTAR.....	61
6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	63
6.1.1 COSTES DE MATERIALES E INFRAESTRUCTURA	63
6.1.2 COSTES DE INSTALACIÓN Y LOGÍSTICA.....	66
6.1.3 COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	67
6.1.4 VIDA ÚTIL Y AMORTIZACIÓN	67
6.1.5 COMPARATIVA CON COSTES ACTUALES DEL AGUA EN TABERNAS	69
6.1.6 SUBVENCIONES Y FINANCIACIÓN.....	70
6.1.7 ESCENARIO Y ESCALABILIDAD.....	70
6.1.8 CONCLUSIÓN ECONÓMICA	71
6.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGOS	71
6.2.1 ANÁLISIS DE RIESGOS	72
6.2.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	73
6.2.3 CONCLUSIONES.....	75
Capítulo 7. IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL	76
Capítulo 8. NORMATIVA LEGAL.....	79
8.1 NORMATIVA REGIONAL (ANDALUCÍA).....	79
8.2 NORMATIVA NACIONAL, LEYES Y DECRETOS.....	80
8.3 NORMATIVA EUROPEA, DIRECTIVAS FUNDAMENTALES	81
Capítulo 9. CONCLUSIONES.....	83
Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA.....	85
ANEXO I: PROGRAMACIÓN.....	89

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i>	<i>Mapa mundial de los países más vulnerables a la sequía.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.</i>	<i>Objetivos de desarrollo sostenible.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3.</i>	<i>Cronograma realización del TFG.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4.</i>	<i>Imagen de un atrapanieblas en el Desierto de Atacama, Chile.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5.</i>	<i>Condensador radiativo por ingenieros del KAUST.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 6.</i>	<i>Torre Warka instalada en Italia (BBC).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 7.</i>	<i>Generador de agua atmosférica (AWS).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 8.</i>	<i>Rotor desecante patentado del fabricante Munters</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9.</i>	<i>Mapa topográfico sierra Alhamilla y Desierto de Tabernas.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10.</i>	<i>Mapa topográfico desierto de las Tabernas.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11.</i>	<i>Evolución de Temperaturas en Taberna a lo largo de los años.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12.</i>	<i>Evolución de Temperaturas en Taberna en el año 2024.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 13.</i>	<i>Evolución de Humedad relativa en Taberna a lo largo de los años.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 14.</i>	<i>Evolución de Humedad relativa en Taberna a lo largo del año 2024.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15.</i>	<i>Precipitación acumulada (30 días) en Taberna a lo largo de los años.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 16.</i>	<i>Precipitación acumulada (30 días) en Tabernas a lo largo del año 2024... </i>	<i>52</i>
<i>Figura 17.</i>	<i>Velocidad máxima del viento en Tabernas a lo largo de los años.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 18.</i>	<i>Velocidad máxima del viento por meses en Taberna en el año 2024.....</i>	<i>55</i>

<i>Figura 19. Radiación solar en Tabernas a lo largo de los años</i>	<i>57</i>
<i>Figura 20. Radiación solar en Tabernas a lo largo del año 2024.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 21. Correlación entre variables meteorológicas a lo largo de los años.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 22. Colector de tubos de vacío Vitosol 200-TM.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 23. Transporte del abastecimiento de agua mediante camiones cisterna en Almería.</i>	<i>69</i>

Índice de tablas

Tabla 3.1 . Tabla comparativa de las técnicas existentes de recolección de humedad.....	30
Tabla 4.1 Tabla comparativa producción de agua	41
Tabla 5.1 Tabla comparativa de las temperaturas máximas y mínimas del Desierto de Tabernas.....	46
Tabla 5.2 Tabla de temperaturas medias por meses del año en Desierto de Tabernas.....	47
Tabla 5.3 Humedad media Desierto de Tabernas a lo largo de los años	49
Tabla 5.4 Tabla humedad relativa mínima/media/máxima Desierto de Tabernas por meses.	50
Tabla 5.5 Precipitaciones acumuladas a lo largo de los años en el Desierto de Tabernas ..	53
Tabla 5.6 Precipitaciones en Desierto de Tabernas ordenados de manera descendente por meses.	53
Tabla 5.7 Velocidades medias a lo largo de los años en el Desierto de Tabernas.	56
Tabla 5.8 Radiaciones solares medias en Desierto de Tabernas a lo largo de los años	58

Capítulo 1. RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto tiene como objetivo hacer un estudio técnico y económico y comparativos de las diferentes técnicas de recuperación de humedad ambiental en el Desierto de Tabernas, ubicado en el sur de España, en la región de Almería, con el fin de poner fin al problema de la escasez hídrica. Para la elección del modelo más apropiado se han seguido los siguientes parámetros, humedad relativa media del 60,089%, unas precipitaciones medias de 243,85 mm, temperatura media de 16,3 °C, velocidad del viento media de 1,839 m/s y, por último, una radiación media de 18,31 MJ/m², valores representativos de la región.

Tras un análisis comparativo y exhaustivo de la viabilidad técnica, energética y económica, el modelo seleccionado ha sido un diseño híbrido de desecantes-condensador, optimizado para operar bajo las condiciones climáticas de Tabernas. Este sistema incorpora un condensador activo alimentado por energía solar fotovoltaica y colectores solares de tubos de vacío para llevar a cabo la regeneración térmica del sólido desecante (zeolitas). Para lograr la producción de agua establecida de 150 litros de agua potable diarios, hace falta un diseño cuya expansión sea de 100 m² de superficie de colectores solares.

La eficiencia energética se optimiza debido a la implementación de energía solar, lo que conlleva a una huella de carbono prácticamente nula durante el funcionamiento del sistema. El robusto sistema y la correcta selección de materiales de buena calidad inicialmente nos aseguran una vida útil prolongada y estabilidad durante ella.

Se ha estimado un CAPEX (inversión inicial) de 121.555€, en los que se cubren los costes de las zeolitas (desecantes), tanques de almacenamiento con su correspondiente filtrado UV, un condensador y los colectores. Los OPEX (gastos operativos) calculados incluyen los reemplazos de desecantes, los mantenimientos preventivos correspondientes y un mínimo consumo eléctrico de respaldo. Estos costes se han proyectado para un horizonte temporal de 15 años. Con estas estimaciones, se ha calculado un LCOW (coste nivelado del agua) de

0,18758 €/L. Este valor, pese a ser ligeramente superior al agua convencional transportada en cisternas, es estratégicamente competitivo por su autonomía frente a situaciones de estrés hídrico o de emergencia.

La obra civil y la puesta en marcha se benefician de la modularidad del sistema lo que nos facilita la adaptación al terreno y la flexibilidad para el mantenimiento futuro o la sustitución de componentes en caso de serlo necesario. Añadido a ello, al estar ubicado en una reserva natural, esta ha de seguir una rigurosa normativa ambiental y urbanística.

En conclusión, el proyecto demuestra la viabilidad técnica y económica a largo plazo de la producción autónoma de agua a partir de la humedad presente en la atmósfera en zonas áridas en las que se sufre de estrés hídrico, ofreciendo una solución al cambio climático y ofreciendo soluciones escalables a otras partes del mundo con características similares a las analizadas en el Desierto de Tabernas, alineándose de tal manera con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Capítulo 2. INTRODUCCIÓN

2.1 CONTEXTO

La sequía es un fenómeno caracterizado por la ausencia prolongada de precipitaciones en relación con el entorno y sus condiciones climatológicas habituales. Es un problema emergente y creciente a escala global, que tiene consecuencias graves y directas tanto para el medio ambiente como para la vida humana y a sectores tal y como la agricultura, o incluso el consumo doméstico. El problema ha sido agravado por la gestión ineficiente del agua, el cambio climático y el crecimiento demográfico.

Sus consecuencias son devastadoras, hoy en día, según la OMS (2022) 2.100 millones de personas carecen de agua potable y la contaminación hídrica causa anualmente medio millón de muertes por enfermedades tal y como la diarrea. Esto ha causado que haya una desconfianza establecida en la sociedad acerca de la calidad del agua que consumimos, es decir, no nos enfrentamos solo a un problema de desabastecimiento de recursos hídricos, sino que, además, la poca agua que hay disponible, no siempre es de la calidad apropiada para el consumo humano.

Los datos que se prevén para el 2050 son aún más alarmantes: 87 países enfrentarán escasez crítica de agua (World Resources Institute, 2020), por tanto, los problemas no solo tendrán que ver con la disponibilidad de agua, sino que tendrán su correspondiente efecto negativo en la biodiversidad y agricultura y, como consecuencia de esto último, en la estabilidad económica de los países que se vean afectados.

En este trabajo de fin de grado se exploran sistemas de recuperación de humedad ambiental, como intercambiadores de calor, ruedas desecantes y membranas, como alternativa innovadora para generar agua potable. Evaluándolos desde un enfoque energético y

sostenible, con la finalidad de identificar las tecnologías más eficientes en zonas que sufren estrés hídrico.



Figura 1. Mapa mundial de los países más vulnerables a la sequía.

2.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Este proyecto tiene como principales objetivos los siguientes:

1. Identificar las posibles tecnologías innovadoras cuyo enfoque sea la gestión sostenible del agua y la distribución a las zonas de mayor escasez de recursos hídricos. Evaluar el impacto ambiental que tenga cada técnica estudiada, así como la capacidad de producción de agua y posibilidad económica de estas.
2. De estas opciones, evaluar la implantación y adaptabilidad de estas tecnologías en las áreas más necesitadas con las condiciones ambientales y sociales correspondientes a cada zona. La implantación de estas tecnologías tiene que ser

capaces de minimizar el consumo eléctrico y maximizar la producción de agua, para así poder hacerlo accesible a mayor número de zonas en sequía.

3. Evaluar las posibles opciones de reducción de sequía no solo a nivel nacional, sino también global.
4. Diseñar estrategias que sean aceptadas socialmente en las zonas donde se vayan a implementar, explicando los beneficios de estas.

2.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)



Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible

Los principales objetivos de desarrollo sostenible con los que se alinea este proyecto de soluciones a la escasez de recursos híbridos son los siguientes:

- **ODS 6: AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO**

Este objetivo implica garantizar la disponibilidad de agua potable, que es la necesidad más básica para el cuidado de salud y el bienestar. Añadido a ella, es esencial para poder reducir la pobreza y garantizar la seguridad alimentaria y los derechos humanos. Se alinea con este objetivo ya que se proponen tecnologías que garanticen el acceso universal al agua potable.

○ **ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA**

Este otro objetivo se enfoca en construir infraestructuras resilientes, promoviendo la industrialización sostenible y la innovación. El crecimiento económico, el desarrollo social y la acción por el clima dependen en un gran porcentaje de las inversiones que se hagan destinadas a la infraestructura, la industria y la innovación. Pese a que se está mejorando este objetivo con el paso del tiempo, aún queda por hacer para lograrlo. Este proyecto aborda este objetivo del desarrollo sostenible ya que fomenta tecnologías tanto innovadoras como sostenibles para la gestión hidráulica.

○ **ODS 13: ACCIÓN POR EL CLIMA**

El cambio climático afectará en algún momento a todas las personas, de todos los continentes de alguna forma. Y posiblemente, no estemos preparados para las consecuencias que este supondrá, como pueden ser las migraciones masivas, o la destrucción de avances logrados en los últimos años. La toma de medidas acerca del cambio climático implica acción inmediata. Este proyecto que busca mitigar la escasez de recursos hídricos, está alineado con este objetivo sostenible al ser la sequía una de las consecuencias del cambio climático.

2.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La presente investigación se basa en una metodología tanto cualitativa como cuantitativa, de enfoque exploratorio y analítico, estructurada en cuatro fases principales que permiten realizar una aproximación progresiva y rigurosa al estudio de las tecnologías de captación

de agua atmosférica en contextos escasez hídrica. A continuación, se detallarán las etapas seguidas.

2.4.1 INVESTIGACIÓN DOCUMENTAL

Esta primera fase tiene como objetivo recopilar y hacer un análisis crítico de información bibliográfica y documental relevante. Para ello, se consultarán informes técnicos, normativas internacionales, artículos científicos y estudios de casos relacionados con tecnologías pasivas, activas e híbridas de recolección de humedad atmosférica, priorizando fuentes recientes y de alta fiabilidad. Esto nos permitirá identificar las tendencias actuales y comprender los principios físicos, materiales y condiciones óptimas de operación de cada solución analizada a posteriori.

2.4.2 SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS RELEVANTES

A partir de los resultados obtenidos en la investigación documental, se procederá a realizar una evaluación comparativa de las diferentes tecnologías identificadas. Para esta fase, se emplearán criterios técnicos, ambientales y económicos, tales y como: la eficiencia de captación, la adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas, el consumo energético, los requerimientos de mantenimiento y el coste de implementación de los respectivos sistemas. Este análisis se lleva a cabo con el fin de identificar las tecnologías con mayor potencial de aplicación real en contextos de ambiente exterior con escasez hídrica severa, priorizando aquellas soluciones con mayor sostenibilidad ambiental, eficientes y aceptadas socialmente.

2.4.3 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD EN ZONAS DE SEQUÍA

En esta etapa, se analizarán las condiciones climatológicas (temperatura, humedad relativa, velocidades de viento, etc.) y económicas (nivel de desarrollo, disponibilidad energética, costes de operación y mantenimiento) de la región escogida para implantar un sistema de recolección de humedad atmosférica, en base a la viabilidad de implementación de cada una de las tecnologías estudiadas con anterioridad.

2.4.4 PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

En la fase final del proyecto, se diseñará un plan estratégico de implementación para la tecnología seleccionada más adecuada, aplicada a la región seleccionada, la cual sufre de escasez hídrica. Este plan abarcará un análisis técnico de instalación, una estimación de costes, una evaluación del impacto ambiental que supondrá y un cronograma de la ejecución del proyecto. Añadido a esto, incluirán indicadores de seguimiento y mecanismos de adaptación, con la finalidad de garantizar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

Las cuatro fases mencionadas, se llevarán a cabo de manera secuencial e interrelacionadas, haciendo posible las retroalimentaciones entre etapas en caso de ser necesario.

El cronograma y plan de trabajo a seguir durante los meses de investigación, se presenta a continuación.

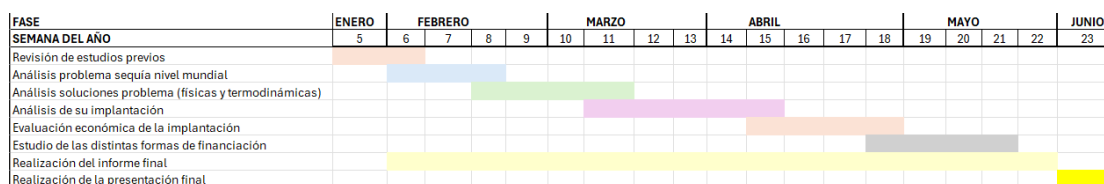


Figura 3. Cronograma realización del TFG.

2.5 RECURSOS QUE EMPLEAR

Para el desarrollo de este trabajo de fin de grado se emplearán principalmente recursos bibliográficos y digitales. Utilizaremos bases de datos académicos tal y como ScienceDirect, Google scholar o SpringerLink para acceder a artículos científicos, publicaciones técnicas y estudios de casos relacionados con técnicas de recolección de humedad ambiental. De la misma manera accederemos a reportes institucionales y documentos normativos tal y como la ONU, la OMS o el FAO, que abarquen la problemática del acceso al agua en zonas áridas.

En cuanto a los recursos técnicos se planea el uso de herramientas tal y como AutoCAD, Microsoft Office o Canva, para la elaboración de diagramas de funcionamiento y propuestas

INTRODUCCIÓN

de implementación. Añadido a ello, para poder realizar el análisis climatológico de la región accederemos a bases de datos ambientales tal y como SIAR, la AEMET o la NASA. Sin embargo, no se planea utilizar recursos físicos o de laboratorio, ya que se trata de una investigación de carácter documental y teórico.

Para la elaboración del presente trabajo de fin de grado, ha servido como herramienta de apoyo a lo largo de la elaboración del proyecto propuesto, la inteligencia artificial (ChatGPT 4.0, Gemini, Deepseek), especialmente en los procesos de investigación y redacción.

Capítulo 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 DEFINICIONES BÁSICAS

3.1.1 HUMEDAD ABSOLUTA [HA]

En un sistema de aire húmedo, la humedad relativa es la relación entre la masa de vapor de agua presente en el aire y el volumen ocupado por la mezcla. Es decir, la densidad del componente de vapor de agua. Se caracteriza ya que no varía con la compresión o expansión adiabática que pueda sufrir el aire, únicamente se ve influenciada por la cantidad real de vapor de agua presente.

$$\text{Humedad Absoluta} = \frac{\text{Masa de vapor de agua [g]}}{\text{Volumen de aire [m}^3\text{]}}$$

3.1.2 HUMEDAD RELATIVA [HR]

La humedad relativa es una medida indicadora de la cantidad de vapor de agua presente en el aire en comparación con la máxima cantidad de vapor que el aire podría obtener sin una variación de temperatura. Puede expresarse tanto en porcentaje:

$$\text{Humedad Relativa} = \frac{\text{Humedad absoluta actual}}{\text{Humedad absoluta de saturación}} * 100\%$$

Como en términos de presión de vapor:

$$\text{Humedad Relativa} = \frac{\text{Presión parcial de vapor de agua en el aire}}{\text{Presión de vapor de saturación}} * 100\%$$

La humedad relativa se ve afectada por los cambios adiabáticos: si hay un enfriamiento del aire, sin que varíe su contenido de vapor, la HR aumenta ya que su presión de vapor de saturación disminuye. Por el contrario, si hay un calentamiento del aire, la HR disminuiría. Añadido a ello, se ve influenciado por la presión atmosférica ya que condiciona la cantidad de vapor que contenga el aire y, por último, la adición o remoción de agua también puede afectar a su resultado.

3.1.3 PUNTO DE ROCÍO

El punto de rocío es la temperatura a la que el aire, en condiciones isobáricas, debe enfriarse para alcanzar la saturación, es decir, una humedad relativa igual al 100%.

$$T_d = T - \left(\frac{100 - HR}{5} \right)$$

Fórmula 1. Cálculo de temperatura de punto de rocío.

Su medida no se ve influenciada por la temperatura ni sus cambios, únicamente por la cantidad de vapor en el aire. Este parámetro es importante ya que nos indica la humedad real el agua, un punto de rocío alto ($T > 20\text{ °C}$), es indicador de altas cantidades de vapor en el aire, por el contrario, un punto de rocío bajo ($T < 20\text{ °C}$), indica un ambiente seco. '

3.1.4 CICLO DE RANKINE

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico idealizado de motores térmicos isobáricos que describe el rendimiento de sistemas de turbinas de vapor cuando estos transforman parte del calor en trabajo mecánico. El calor aportado al circuito cerrado que, por lo general, utiliza agua (tanto en fase líquida como en vapor) proviene de una fuente externa, a diferencia de otros procesos como el ciclo de Brayton, el ciclo de Rankine sufre un cambio de fase en el estado de agua.

Consta de cuatro procesos fundamentales:

1 → 2: Compresión isentrópica (bomba): proceso mediante el cual el fluido, en nuestro caso el agua es estado líquido, en condiciones adiabáticas, es comprimido por una bomba, provocando un aumento de presión y entalpía, sin que afecte a la entropía.

2 → 3: Adición de calor a presión constante (caldera o evaporador): Mediante este mecanismo de adición de calor, el fluido comprimido (agua líquida) es calentado en una caldera hasta pasar a ser vapor sobrecalentado.

3 → 4: Expansión isentrópica (turbina o compresor inverso): El vapor, en condiciones adiabáticas, se expande en una turbina, consiguiendo generar trabajo mecánico, a la par que una disminución de la temperatura y presión de este.

4 → 1: Rechazo de calor a presión constante (condensador): Proceso inverso al 2-3, en este caso, el vapor expandido se condensa en un condensador, liberando de esta manera el calor y retornando al estado líquido.

El ciclo es descrito por ecuaciones basadas en el balance de energía y masa, explicadas a continuación, (en donde h hace referencia a la entalpía en las diferentes etapas del ciclo):

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{in}} = \frac{(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$$

Fórmula 2. Eficiencia térmica del ciclo de Rankine.

El trabajo neto hace referencia al trabajo requerido en la turbina, en donde $W_t = (h_3 - h_4)$, y del trabajo del funcionamiento de la bomba, $W_B = (h_2 - h_1)$. Para el correcto funcionamiento de este ciclo es esencial la correcta elección del fluido, el cual ha de tener las correctas propiedades termodinámicas, esto implica, estabilidad térmica y alta entalpía de vaporización.

Si bien es cierto que habría que estudiar con cautela este proceso por sus requerimientos de altos costes y mantenimiento, contamos con la ventaja de tener agua a nuestra disponibilidad ya que es el eje central del proyecto a plantear. El agua se podría considerar fluido ideal para

el ciclo de Rankine, por su estabilidad térmica a temperaturas oscilantes, es decir, por ser capaz de resistir a altas temperaturas sin que se está se descomponga químicamente, por su facilidad para condensarse y recircular, su bajo coste, su adaptabilidad técnica y, por último, su alta capacidad para absorber calor, es decir, por su entalpía de vaporización.

3.2 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE HUMEDAD AMBIENTAL

Esta sección explora, analiza y clasifica técnicas desarrolladas, innovadoras y adaptativas, capaces de obtener agua a partir del vapor, la niebla o la condensación del aire ambiental, sin la necesidad de recurrir a fuentes hídricas tradicionales. Estas estrategias se clasifican en dos grandes grupos principalmente, las pasivas y las activas. Las técnicas pasivas se basan en principios físicos naturales tal y como la radiación o la gravedad, destacando así por su bajo coste y escaso mantenimiento. Por otro lado, las técnicas activas, éstas requieren de energía externa, pero ofrecen una producción de agua constante, sin importar las condiciones ambientales de la región. A través de una descripción detallada de cada tecnología, se analizará no solo sus principios de funcionamiento, sino sus materiales, diseño y condiciones óptimas de operación. Añadido a ello, se presenta una categoría mixta, que combina ambos sistemas de recolección de humedad: los sistemas híbridos, que, combinando elementos de ambas estrategias, se benefician de las ventajas individuales de cada técnica, optimizando así la eficiencia energética y adaptabilidad de los sistemas en diferentes regiones.

-SISTEMAS PASIVOS-

Estos sistemas operan sin requerir de energía externa, simplemente requieren de principios naturales y físicos tal y como, la gravedad, la radiación solar, la evaporación o las diferencias de temperatura. Además, al no tener incorporados partes móviles complejas, estos requieren bajo mantenimiento.

3.2.1 ATRAPANIEBLAS

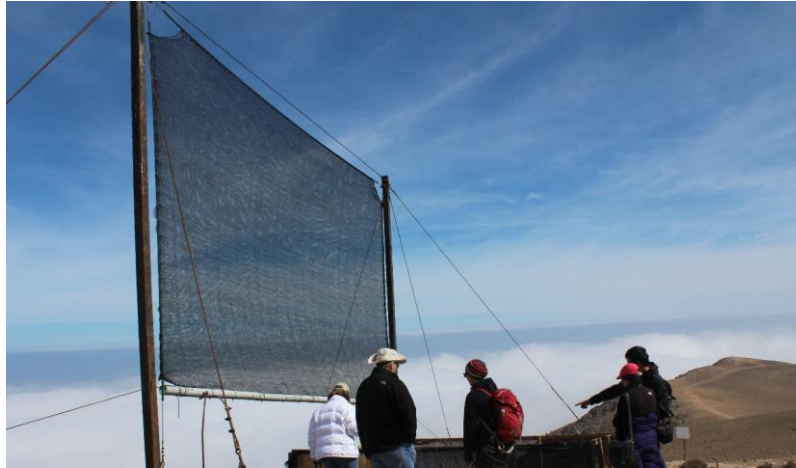


Figura 4. Imagen de un atrapanieblas en el Desierto de Atacama, Chile.

Previo a la explicación del sistema de los atrapanieblas, es fundamental definir la niebla, la niebla son microgotas de agua ($1\text{-}40\ \mu\text{m}$), suspendidas en aire, que han sido formadas bien por el contacto con superficies frías o bien por el enfriamiento adiabático. Este fenómeno es esencial para los sistemas pasivos de recolección de humedad ambiental.

Los atrapanieblas son un sistema pasivo de recolección de humedad ambiental, siendo así una solución al problema de la escasez hídrica innovadora, económica y sostenible. Capaces de captar agua en zonas áridas con alta presencia de niebla frecuente. Su funcionamiento se basa en que su diseño es capaz de absorber las diminutas gotas de agua presentes en la niebla y transformarlas en agua utilizable. Su diseño consta de paneles en forma de malla, normalmente fabricados con materiales tal y como el polipropileno o el polietileno, ubicados en lugares elevados en donde la niebla será más densa que en el resto de la superficie. Estas mallas captan las gotas presentes en la niebla, que chocan con las mallas debido a la inercia, agrupándolas en gotas más grandes al rozar las fibras de la malla y que se conducen a tanques de almacenamiento a través de tuberías. Esta técnica se caracteriza por su eficiencia, simplicidad y durabilidad.

A la hora de instalar las mallas en la región de estudio, es esencial tener en cuenta la dirección del viento presente, ya que éstas han de colocarse perpendiculares al viento dominante. A su misma vez, la estructura de las mallas es esencial para la optimización de la recolección de agua, las estructuras 3D aumentan la captación y la turbulencia de agua, frente a las mallas simples. La geometría que han de tener las mallas tiene que ser con fibras de entre 0,3-0,5 mm, para así equilibrar la resistencia al viento a la par que el área superficial, junto con una porosidad media baja, alrededor del 30-50%, que, aunque no reduzca significativamente la resistencia al viento, si que optimiza la captación del agua. Los materiales habituales con los que son construidas son Polietileno, nylon o acero inoxidable recubierto. Por último, de ser posible, es preferible ubicar las mallas en valles que canalicen el flujo de niebla presente en el ambiente.

Las condiciones óptimas en las que opera eficientemente el sistema de recolección de humedad mediante atrapanieblas, es en regiones con velocidades de viento entre los 3 m/s y 8 m/s, esto es debido a que velocidades de viento mayores podrían romper las gotas de agua presentes. A su misma vez, requieren de niebla densa, por tanto, necesitan de ambientes con humedades relativas mínimas superiores al 70% y de temperaturas nocturnas bajas que favorecen la condensación de la niebla.

3.2.2 CONDENSACIÓN RADIATIVA PASIVA



Figura 5. Condensador radiativo por ingenieros del KAUST

La condensación radiativa pasiva es un fenómeno físico que permite la obtención de agua del aire sin necesidad de energía externa, usando únicamente el enfriamiento natural de las superficies durante la noche. Su aplicación es de gran relevancia en zonas con escasez hídrica, en las que no hay niebla, pero sí grandes oscilaciones térmicas. El principio por el que se rige es el siguiente: durante la noche, ciertos materiales con los que son construidos la superficie son capaces de emitir radiación infrarroja ($8\text{-}13\text{ }\mu\text{m}$) hacia el espacio exterior. En caso de haber noche despejada, estas radiaciones llegan al espacio, enfriando así la superficie, si está es capaz de disminuir su temperatura por debajo de la temperatura de rocío, el vapor de agua presente en la atmósfera se condensa en gotas. Finalmente, estas gotas mediante gravedad o por el uso de superficies hidrofóbicas, se deslizan hasta llegar a un sistema de almacenamiento.

Para optimizar el funcionamiento del sistema, es esencial la correcta elección del material de la superficie, siendo esencial que estos tengan alta emisividad en infrarrojo ($\varepsilon > 0.9$) y, a su misma vez, baja absorción solar, para evitar el calentamiento durante horas diurnas. A su misma vez, la superficie ha de estar preferiblemente inclinada 30° para mejorar el escurrido de las gotas y con estructuras cónicas para aumentar la emisividad de radiación infrarroja. En caso de requerir una ayuda adicional para facilitar el escurrido de las gotas, se podrían aportar tratamientos de hidrofobicidad controlada.

Añadido a estas características del material, la condensación radiativa pasiva requiere de ciertas condiciones meteorológicas que aumentarían el rendimiento del sistema. Por un lado, se requiere de altas humedades relativas (superiores al 70%) para así facilitar la condensación de la humedad presente. Es de alta relevancia también, que la velocidad del viento sea baja, con cifras medias menores a los 2 m/s , ya que vientos con mayor velocidad aumentarían la convección y por tanto se vería reducido el enfriamiento radiativo.

3.2.3 POZOS DE ROCÍO

Los pozos de rocío son estructuras pasivas cuyo diseño está enfocado en optimizar la condensación de agua atmosférica, estos operan bajo principios termodinámicos y de transferencia de masa-calor, en donde el vapor del agua presente en la atmósfera, al chocar con superficies frías cambian de fase a líquido.

El primer proceso es el del enfriamiento radiativo nocturno, en el que, por acción de las superficies del pozo, se emiten emisiones infrarrojas (8-13 μm) hacia el cielo, que, en caso de haber noche despejada, estas llegarán al espacio, haciendo así que se enfríe la superficie por debajo de la temperatura de rocío, facilitando la condensación natural

El pozo es una infraestructura vertical, en la que, para optimizar el funcionamiento del sistema, es esencial que haya una estratificación de diferentes materiales. La parte superior, encargada de llevar a cabo la condensación del vapor de agua, debe tener idílicamente forma cónica o piramidal y estar formado por roca caliza o materiales pulidos, con revestimientos de alta emisividad infrarroja, pero baja emisividad solar. Seguidamente, la parte intermedia del pozo es la encargada del aislamiento, por tanto, se usan capas de aire o materiales reflectivos, para evitar la ganancia térmica desde superficies inferiores a esta. Por último, la parte más profunda, es la encargada del drenaje y almacenamiento del agua recolectada, por tanto, contienen canales inclinados o tanques enterrados, idealmente se podrían implantar filtrados de arena o carbón para la prepotabilización del agua, para su posterior consumo.

-SISTEMAS ACTIVOS -

Estos sistemas de recolección de humedad atmosférica están diseñados con tecnologías que requieren de energía externa, ya sea, eléctrica, térmica o mecánica. A diferencia de los sistemas pasivos que requieren de condiciones meteorológicas óptimas para su funcionamiento, estos sistemas son ideales para aquellas regiones en las que la humedad relativa es baja o la demanda de agua es constante.

3.2.4 SISTEMAS DE MEMBRANAS



Figura 6. Torre Warka instalada en Italia (BBC).

Los sistemas de membranas constituyen una tecnología emergente que permite extraer agua del aire utilizando materiales semipermeables capaces de captar selectivamente el vapor de agua. Son sistemas activos ya que requieren de energía externa tanto para mantener las condiciones internas adecuadas para la condensación, como para forzar el paso del aire a través del sistema.

El principio por el que se rige el funcionamiento de este sistema es la diferencia de presión parcial del vapor de agua entre dos medios separados por una membrana selectiva. Estas membranas están formadas por materiales hidrofílicos que permiten el paso de agua mientras bloquean otros gases, facilitando así de esta manera la posterior condensación o bien en una superficie enfriada, o bien en un compartimento de menor presión.

La gran mayoría de estos sistemas suelen incorporar consigo ventiladores, bombas de vacío o elementos termoeléctricos, para crear corrientes de aire forzado y condiciones de baja presión o temperatura en las cámaras de recolección, acelerando de esta manera la transferencia de vapor a través de la membrana.

Para el funcionamiento óptimo del sistema, se requieren determinadas características atmosféricas tal y como, una humedad relativa superior al 60%, teniendo en cuenta que la

eficacia del sistema aumenta conforme aumenta la humedad relativa. Temperaturas ambientes con grandes oscilaciones, ya que altas temperaturas contienen mayor cantidad de agua, pero también se requieren bajas temperaturas para condensar más fácilmente el agua. La velocidad del viento es también un aspecto fundamental, siendo las condiciones óptimas velocidades de entre 1 y 3 m/s, facilitando el contacto con la superficie de la membrana y renovando el aire saturado, pero evitando velocidades mayores que provocarían el arrastre de las gotas de agua. Añadido a ello, la presión diferencial es fundamental, es esencial tener presiones más bajas en la cámara de recolección en donde se llevará a cabo la condensación.

3.2.5 GENERADORES DE AGUA ATMOSFÉRICA



Figura 7. Generador de agua atmosférica (AWS)

Los generadores de agua atmosférica (AWS), funciona bajo un sistema parecido a los pozos de rocío con ayuda de energía externa, extrayendo vapor de agua contenido en el aire y, posteriormente, condensándolo mediante procesos termodinámicos controlados. El proceso de condensación llevado a cabo se obtiene cuando el aire húmedo de la atmósfera se enfría por debajo de la temperatura de rocío, convirtiéndose así el vapor en agua líquida. La condensación puede ser o directa, por enfriamiento, o asistida, con ayuda de materiales de desecantes que aumenta la eficiencia del proceso.

Los componentes principales del sistema son los siguientes: un compresor mecánico, encargado de hacer circular el refrigerante elevando la presión y temperatura del mismo, un condensador, encargado de disipar el calor generado, una válvula de expansión, que reduce abruptamente la presión, enfriando así el refrigerante, un evaporador, que hace que se evapore el agua de aire, un ventilador, en el que se introduce aire atmosférico al sistema y un sistema de filtrado y purificador, que tratará el agua recolectada para hacerla potable. Y finalmente, un depósito de almacenamiento, que acumulará el agua ya tratada para su posterior consumo.

Aunque no es recomendable su aplicación en proyectos de pequeña escala subido a la complejidad y los requerimientos energéticos que supone, el ciclo de Rankine (explicado en apartados previos) es teóricamente aplicable en proyectos de gran escala, como sería el caso de su implantación en el Desierto de Tabernas al disponer de energías renovables y altos índices de radiación solar.

En el hipotético caso de que los generadores de agua atmosférica fueran la técnica que más se adecue a las condiciones meteorológicas del Desierto de Tabernas, podríamos considerar la aplicación del ciclo de Rankine. De implantarlo en el sistema, habría que hacerlo de la siguiente manera: En primer lugar, habría que establecer una fuente de calor, ya sea calor residual industrial, o una técnica más sostenible como podrían ser los paneles solares, aprovechando la alta radiación de la zona en la que nos encontramos, que será la encargada de calentar el fluido. Seguidamente, habría que instalar una turbina, encargada de accionar el compresor o el sistema de refrigeración del fluido. Posteriormente, habría que evaluar si fuera necesario instalar un condensador, o las condiciones que se dan son suficientes para que el aire refrigerase por debajo de la temperatura de rocío para que se diera la condensación del fluido. Finalmente, se procedería a la instalación de un recolector para el almacenaje del agua obtenida. Pese a que sea posible e incluso potenciase la producción de agua de la región, habría que evaluar cuidadosamente la viabilidad económica del sistema al incluir un ciclo de Rankine, no solo por la instalación inicial, sino por los elevados costos de mantenimiento que hicieran falta posteriormente.

Su funcionamiento óptimo es condicionado por condiciones atmosféricas, en primer lugar, la humedad relativa debe estar en un rango de entre 30%, con temperaturas ambientales elevadas (20 °C – 40 °C), que harán que el contenido de vapor atmosférico sea mayor.

Lo que diferencia esta técnica respecto de otras técnicas pasivas, es que los generadores de agua atmosférica garantizan la producción constante independientemente de las condiciones climáticas exteriores. Sin embargo, sí que requieren de infraestructuras eléctricas para su funcionamiento.

3.2.6 DESECANTES

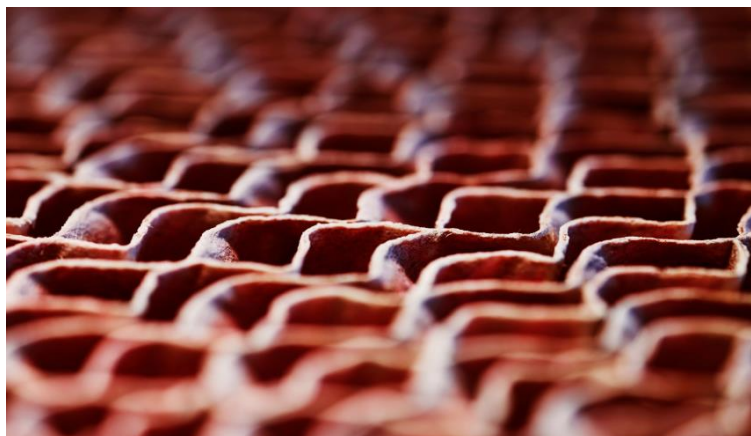


Figura 8. Rotor desecante patentado del fabricante Munters

Los sistemas de desecantes son una tecnología activa que utiliza materiales higroscópicos para capturar vapor de agua del aire mediante interacciones fisicoquímicas, almacenándolas temporalmente y, posteriormente, tras la aplicación de calor, el agua es liberada del desecante y recolectada mediante condensación. Representan una tecnología eficiente y adaptable para extraer agua del aire, con especial aplicación en regiones con clima árido o con baja humedad relativa, en donde otros métodos no son aplicables. Son activos ya que requieren de energía externa para el ciclo de regeneración del material desecante.

Hay dos tipos de desecantes principales, los desecantes líquidos (formados por soluciones salinas como cloruro de calcio o cloruro de litio, o soluciones ácidas como sulfúrico diluido),

o los desecantes sólidos (como el gel de sílice, zeolitas, alúmina activada, MOF's – Metal Organic Frameworks). Sin importar el tipo de desecantes, ambos se rigen por un ciclo continuo dividido en dos fases esenciales de recolección y regeneración. La recolección o absorción, en donde el aire pasa a través de una superficie recubierta con desecante que se encarga de capturar el vapor de agua, secando así el aire de salida. Y la fase de regeneración o desorción, en donde con ayuda de una fuente externa (ya sea una bomba de calor, energía solar o eléctrica), el desecante saturado es calentado con el fin de extraer el agua absorbida, para posteriormente condensar y almacenar.

Al igual que el resto de las técnicas de recolección de humedad, tiene ciertos rangos de condiciones atmosféricas en las que el sistema operara con mayor eficiencia. En primer lugar, la humedad relativa ha de ser superior al 15 %, con temperaturas ambientales de entre 10 °C y 40 °C para la absorción del aire y con temperaturas superiores a los 60 °C para regenerar el material (materiales como las zeolitas requieren de temperaturas más elevadas). La velocidad del aire juega un papel fundamental, requiriendo flujos de aire constantes con velocidades de entre 1 y 3 m/s.

3.2.7 SISTEMAS HÍBRIDOS

Finalmente, los sistemas híbridos de recolección de humedad atmosférica combinan estrategias activas y pasivas, o integran en su funcionamiento diferentes tecnologías simultáneamente. Su principal objetivo es maximizar la capacidad de captación de agua, a la par que la eficiencia energética, ampliando los rangos óptimos de funcionamiento de cada técnica individual por separado, haciéndolos de esta manera adaptables a entornos más variables.

Los sistemas híbridos suelen integrar al menos, dos de las siguientes técnicas individuales mencionadas a continuación (todos ellos explicados de manera extensa en secciones anteriores).

- Desecantes: captación de agua mediante materiales higroscópicos, que absorben el vapor de agua del aire.

- Condensación asistida: posterior a la saturación del desecante, se aplica energía externa para desorber el vapor y pasarlo a un sistema de condensación.
- Condensación directa forzada: según los climas en los que se aplique el sistema, es necesario introducir un proceso de enfriamiento mecánico controlado, para llevar a cabo la condensación sin depender de la humedad relativa exterior, que tendría que ser muy elevada.

El hecho de que los materiales desecantes se encuentren en un volumen reducido facilita el ahorro energético del proceso ya que no es necesario enfriar todo el caudal de aire atmosférico.

Según la combinación de mecanismos individuales que se utilicen en el sistema, dan lugar a la siguiente clasificación de sistemas híbridos.

- **SISTEMAS PASIVO-PASIVO:**

Estos sistemas están caracterizados por su bajo consumo eléctrico ya que ninguno de sus sistemas individuales integrados requiere de energía externa para su funcionamiento, se rigen bajo principios naturales. Son de gran aplicabilidad para ambientes áridos y calientes. Sin embargo, la producción de agua es baja comparada con otras combinaciones de técnicas.

- Desecante sólido/Atrapanieblas + condensador radiativo nocturno: El desecante sólido (o los atrapanieblas) es el encargado de absorber la humedad atmosférica durante el día, que posteriormente, en la noche, el vapor será condensador por enfriamiento gracias a las emisiones radiativas hacia el cielo.

- **SISTEMAS PASIVO-ACTIVO:**

Los sistemas pasivo-activo, tienen un consumo de energía medio, con producción de agua superior a los sistemas pasivo-pasivo. Son de gran aplicabilidad para ambientes más templados y secos. No obstante, al tener integrado un sistema activo, requieren de mantenimiento de las maquinarias.

- Desecante + condensador eléctrico: El desecante, de manera natural absorbe el vapor de agua presente en la atmósfera, sin embargo, requiere de un sistema activo, como puede ser un condensador, que se encargue de condensar el vapor liberado.

- **SISTEMAS ACTIVO-ACTIVO:**

Los sistemas activo-activo, no están condicionados por las condiciones atmosféricas exteriores, por tanto, son de aplicables en regiones con todo tipo de climas, a su misma vez, producen grandes cantidades de agua. No obstante, consumen grandes cantidades de energía para su funcionamiento y requieren de altos niveles de mantenimiento de su infraestructura.

- Generador de agua atmosférica + Deshumidificación por membranas: Con ayuda de ventilación forzada, se consigue que el aire pase a través de las membranas, seleccionando y separando las partículas de vapor de otros tipos de gases que pueda haber presentes en la atmósfera. Posteriormente, estas partículas de agua son concentradas y comprimidas con ayuda externa, para su posterior tratamiento para su potabilización.

3.2.8 TABLA COMPARATIVA DE TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE HUMEDAD ATMOSFÉRICA:

TÉCNICA	TIPO	ENERGÍA REQUERIDA	CONDICIONES ÓPTIMAS	MANTENIMIENTO	PRODUCCIÓN DE AGUA	SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL	CICLO DE VIDA
ATRAPANIEBLAS	Pasiva	-	. Niebla alta . Vientos 3-8 m/s . HR > 70 %	Bajo	Intermedia	Alta	Largo
CONDENSACIÓN RADIATIVA	Pasiva	-	. Noche despejada . HR > 70 % . Vientos < 2 m/s	Bajo	Baja-Intermedia	Alta	Largo
POZOS DE ROCÍO	Pasiva	-	. Noches frías . HR > 70 % . Baja radiación solar	Bajo-Intermedio	Baja-Intermedia	Alta	Intermedio-Largo
MEMBRANAS SELECTIVAS	Activa	Sí (térmica/eléctrica)	. HR > 60 % . Oscilación térmica . Vientos de 1-3 m/s	Intermedio-Alto	Alta	Intermedia	Intermedio
GENERADORES DE AGUA	Activa	Sí (eléctrica)	. HR > 30% . T: 20 °C – 40 °C	Alto	Alta	Baja	Corto-Intermedio
DESECANTES	Activa	Sí (eléctrica/calor)	. HR > 15 % . T: 10 °C-40 °C	Intermedio	Alta	Intermedia	Intermedio
SIST. HÍBRIDOS	Híbrido	Variable	Variable	Variable	Alta	Variable	Intermedio
H. PASIVO-PASIVO	Híbrido	No	Ambientes áridos con alta radiación infrarroja	Bajo	Bajo-Intermedio	Muy alta	Largo
H. PASIVO-ACTIVO	Híbrido	Intermedia	Climas templados y secos	Intermedio	Intermedio-Alto	Alta	Intermedio
H. ACTIVO-ACTIVO	Híbrido	Alta	Todo tipo de climas	Alto	Muy alto	Baja	Corto-Intermedio

Tabla 3.1 . Tabla comparativa de las técnicas existentes de recolección de humedad

Capítulo 4. METODOLOGÍA

4.1 CRITERIOS DE COMPARACIÓN

Los indicadores de eficiencia energética se encargan de cuantificar el rendimiento del sistema de recuperación de humedad a analizar desde un punto de vista tanto teórico, basándose en la termodinámica, como práctico, basado en el consumo energético real.

4.1.1 PRODUCCIÓN DE AGUA TEÓRICA POR METRO CUADRADO

En este apartado tiene como finalidad comparar de manera rigurosa la capacidad de captación hídrica de las distintas técnicas descritas con anterioridad, mediante un análisis teórico de su producción potencial estandarizada por metro cuadrado de área útil. La aproximación de producción de agua tendrá en cuenta factores tal y como la humedad relativa media, las temperaturas medias, la velocidad del viento, la radiación solar y la superficie efectiva de intercambio entre el aire y el sistema. Los datos utilizados serán los mismos para la evaluación de cada técnica, con el fin de establecer un marco comparativo homogéneo entre cada una de ellas. La producción de agua teórica se expresa generalmente en litros/día·m², con el fin de facilitar la interpretación de los resultados y su aplicación práctica en los diversos diseños.

Para ello es fundamental tener en cuenta la superficie total de la que disponemos en el Desierto de Tabernas. Según la Junta de Andalucía, la región abarca una extensión de 11.448,49 hectáreas, que equivalen aproximadamente a 114,48 km².

En este primer acercamiento con el rendimiento del sistema, usaremos los datos promedio anuales más representativos de cada variable. Más adelante, cuando ya tengamos el sistema más adecuado escogido. Haremos un estudio más específico para optimizar el servicio por temporadas del año. Para ello, los datos que utilizaremos por ahora serán los siguientes: humedad relativa media del 60,089%, unas precipitaciones medias de 243,85 mm,

temperatura media de 16,3 °C, velocidad del viento media de 1,839 m/s y, por último, una radiación media de 18,31 MJ/m².

4.1.1.1 Atrapanieblas

Las condiciones que se dan en el desierto de Tabernas no son las más adecuadas para este tipo de sistemas, los cuales requieren de las siguientes condiciones óptimas: vientos medios entre 3-8 m/s y humedades relativas superiores al 70 %, condiciones que darán lugar a altas cantidades de niebla en la región.

El desierto de tabernas se encuentra a una altitud media de 400 msnm, que varía según nos encontremos en valles (200-300 msnm) o zonas elevadas como cerros (600-700 msnm). Para maximizar los atrapanieblas, estos han de colocarse entre 400-1.000 msnm, por tanto, en caso de elegir este sistema, este debería colocarse en sierras cercanas como la Sierra de los Filabres o la Sierra Almahilla (600 msnm).

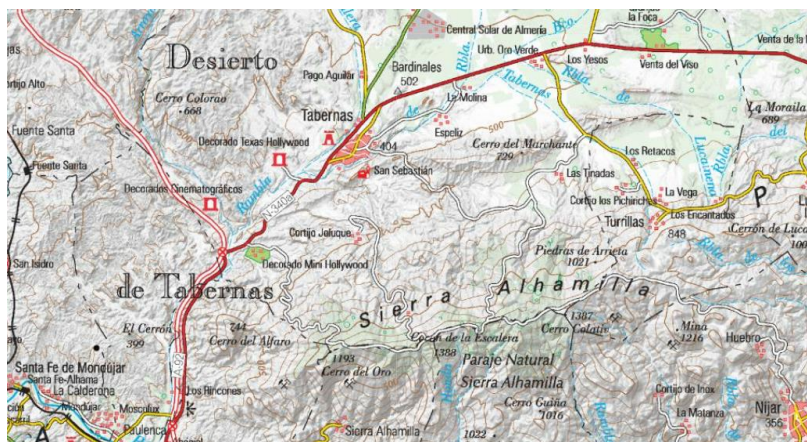


Figura 9. Mapa topográfico sierra Almahilla y Desierto de Tabernas.

En la sierra de Almahilla, en donde se llevaría a cabo la instalación de los atrapanieblas para posteriormente transportar el agua recolectada al Desierto de Tabernas, las velocidades del viento son ligeramente superiores, tienen humedades relativas superiores y, por tanto, hay mayor facilidad para la formación de niebla en estas condiciones.

La fórmula con la que calcularemos la producción de agua diaria será la siguiente:

$$Q = \eta * LWC * v * A * t * f$$

Fórmula 3. Producción diaria de los atrapanieblas

En donde, η , es la eficiencia de captura de la red, para las mallas Raschel, son de un 30%, LWC, es el contenido de líquido en niebla, que en climas semiáridos, el contenido promedio es de 0.35 g/ m³, v, es la velocidad del viento, cuyo promedio en la Sierra de Alhamilla es de 4 m/s, A, es el área de la malla, que para estandarizar resultados supondremos 1 m² que más adelante extrapolaremos a superficies más grandes y, por último, t, que es la duración de la niebla, condición que se da en horarios nocturnos, es decir, una duración de 8 horas (28 800 s). Posteriormente, ajustaremos el resultado teniendo en cuenta que la niebla no es consistente, aplicaremos un factor, f, del 30%.

Con estos datos, obtenemos una producción de agua diaria por metro cuadrado de 3,6 L/m²/día.

Que, comparado con la producción que obtendríamos con la instalación en el propio desierto de Tabernas, cuyo valor sería de 1,66 L/ m²/día, obtenemos un aumento de producción de agua del 116,86%. Esto es debido a que las condiciones climatológicas en el Desierto de Tabernas como tal no entran en el rango de condiciones de funcionamiento óptimas del sistema.

4.1.1.2 Condensación radiativa

Para el cálculo de producción de agua mediante sistemas de condensación radiativa, basaremos el cálculo en modelos de balance energético de la superficie condensadora, los datos climatológicos del Desierto de Tabernas y, por último, en ecuaciones termodinámicas validadas experimentalmente.

Pese a que la temperatura media sea de 16,3 °C, utilizaremos la temperatura mínima media, que es 9,9 °C, ya que la condensación tendrá lugar por las noches, en donde las temperaturas

son las mínimas. Lo mismo ocurre con la humedad relativa, está aumentada en horarios nocturnos, por tanto, utilizaremos para el estudio, el promedio de las humedades relativas máximas, que es de 85,918%.

En primer lugar, procederemos a calcular la temperatura de rocío media, para ello, aplicaremos la fórmula de Magnus para tener una aproximación de la temperatura a la que ocurrirá la condensación, en función de la humedad relativa y la temperatura ambiente.

$$T_{\text{rocío}} = \frac{b * \left[\frac{a * T}{b + T} + \ln (HR) \right]}{a - \left[\frac{a * T}{b + T} + \ln (HR) \right]}$$

Fórmula 4. Fórmula de Magnus, usada para el cálculo de temperatura de rocío.

Teniendo en cuenta la humedad relativa media del 85,915% y, que a y b son constantes cuyos valores son 17,27 °C y 237,7 °C respectivamente, nos da una temperatura de rocío de 7.65°C, temperatura a partir la cual empezará a ocasionarse la condensación.

Añadido a la temperatura de rocío, que es esencial para el cálculo, se requiere el conocimiento de la temperatura de la superficie condensadora, la cual, ha de ser menor a la de rocío. El hecho de que la temperatura de la superficie llegue a tener temperaturas inferiores a las de rocío, es por el hecho de que la superficie, por radiación infrarroja, expulse calor hacia el cielo nocturno.

$$T_{\text{sup}} = T_{\text{atm}} - \Delta T_{\text{rad}}$$

Fórmula 5. Cálculo de la temperatura de la superficie.

Usaremos una diferencial de temperatura debido al enfriamiento radiativo (ΔT_{rad}) de 8 °C, valor realista con materiales con alta emisividad infrarroja (películas de SiO₂ $\epsilon \approx 0,95$) y, en desiertos con baja convección, [Zhou et al., 2020; Tso et al., 2017], por lo que tendríamos que instalar protectores de viento. Con estos datos, nos daría una temperatura de superficie

de 1,9 °C, que efectivamente es inferior a la temperatura de rocío, por lo que nos daría lugar a la condensación de la humedad recolectada.

Posteriormente, tenemos que considerar el flujo de agua condensada, para ello, se aplicara la ecuación de transferencia de masa (adaptada para condensación pasiva), cuya fórmula se muestra a continuación.

$$\dot{m} = h_m * (HR * p_{sat}(T_{atm}) - p_{sat}(T_{surf})) * t$$

Fórmula 6. Ecuación del flujo de masa adaptada para condensación pasiva

Para el cálculo de la transferencia de masa, en donde h_m hace referencia al coeficiente de transferencia de masa y, $P_{sat}(T)$ la presión de vapor saturado a temperatura T, habría que hacer los siguientes cálculos para la obtención de los valores requeridos. Añadido a ello, usaremos un área de 1 m² para la estandarización de los resultados.

$$P_{sat}(T) = 610,94 * e^{\left(\frac{17,625 * T}{T + 243,04}\right)} [Pa]$$

Fórmula 7. Fórmula de August-Roche-Magnus para la obtención de presión de vapor saturado

$$\Delta P = (HR * p_{sat}(T_{atm}) - p_{sat}(T_{surf}))$$

Fórmula 8. Diferencia de presiones.

Al sustituir en esta fórmula de cálculo de presión de vapor saturado, obtenemos un valor de $P_{sat}(9,9\text{ °C}) = 1217,84\text{ Pa}$ y, $P_{sat}(2,9\text{ °C}) = 705,6\text{ Pa}$. La diferencia de presiones nos saldría de 341 Pa.

$$h_m \approx 0.036 * u^{0.8} * 10^{-5}$$

Fórmula 9. Fórmula obtención coeficiente de transferencia de masa

Nuevamente, sustituyendo en la fórmula el valor de la temperatura media del aire, obtenemos un coeficiente de transferencia de masa igual a $5,86 * 10^{-7}$, valor que refleja una transferencia lenta, típica de sistemas pasivos con baja convección.

Finalmente, una vez conocemos el valor del flujo de masa, que, sustituyendo los datos obtenidos, es de $1,875 \cdot 10^{-5}$, procederemos a la obtención de producción de agua diaria. Pese a que la radiación ocurra en horario nocturno, la temperatura no alcanza valores inferiores a los de rocío toda la noche, es por ello, que tendremos en cuenta que habrá entre dos y cuatro horas útiles de condensación, es decir, 10800 segundos por día, eligiendo un rango de seguridad bastante elevado, ya que, en zonas costeras, se puede llegar a alcanzar las cinco o seis horas útiles de condensación.

$$\dot{V} = \dot{m} * \frac{A}{\rho_w} * t$$

Fórmula para el cálculo de producción diaria.

Con una densidad de agua de 1.000 kg/m^3 , nos sale una producción de agua con el sistema de condensación radiativa de $2,16 \text{ L/m}^2/\text{día}$, valor coherente para desiertos costeros en los que hay noches húmedas. A la hora de instalar este sistema habría que tener en mente la instalación de protectores de viento, ya que con altas velocidades se puede llegar a reducir la convección y, por tanto, ΔT_{rad} y, en consecuencia, la producción de agua.

4.1.1.3 Pozos de rocío

Los pozos de rocío utilizan una técnica de recolección de humedad atmosférica similar a la de la condensación radiativa, es por ello, que utilizaremos tanto la humedad relativa y las temperaturas media nocturnas, que es cuando se llevará a cabo la condensación del agua. Sin embargo, la cavidad del pozo protege el sistema del viento es por ello, que la velocidad media se verá reducida, utilizaremos un valor estándar representativo de $0,5 \text{ m/s}$. Añadido a ello, ya que las dimensiones del pozo afectan a la acumulación de aire frío y, por tanto, a la condensación, ya que, a mayor profundidad, mayor aire frío hay. Para ello, utilizaremos un diseño estándar de diámetro 2 m y profundidad de $1,5 \text{ m}$.

En primer lugar, calcularemos el área total de condensación que tendremos con un único pozo, con la fórmula mostrada a continuación, obtenemos un área de 14 m^2 .

$$A = \pi * \varnothing * h + \pi * \left(\frac{\varnothing}{2}\right)^2$$

Fórmula 10. Cálculo del área de la superficie de condensación de un pozo de rocío.

basándonos en los resultados obtenidos en el apartado previo, tenemos una temperatura de rocío de 7,65 °C. Sin embargo, a la hora de calcular la temperatura de la superficie hay una discrepancia con el resultado obtenido, ya que, al haber mayor enfriamiento en el fondo del pozo, hay una ΔT_{rad} mayor, dejándonos una T_{surf} de 0,9 °C, temperaturas inferiores tampoco nos interesarían ya que podrían provocarnos la formación de hielo. Sustituyendo en la fórmula de variación de presión, obtenemos un resultado de 341 Pa. El coeficiente de masa varía ligeramente por la presencia de turbulencias en el interior del pozo, teniendo así un coeficiente de $1.5 \cdot 10^{-6}$.

Al igual que en el cálculo para la condensación radiativa, utilizaremos un cómputo de tres horas efectivas, sin embargo, la obtención de agua real debería ser superior al calculado por el hecho de que en regiones costeras la duración de las condiciones favorables se extiende hasta las cinco horas. Sustituyendo los valores obtenidos, vemos una producción de 5,524 L/pozo/día.

Además, deberíamos tener en cuenta para el cómputo total de recolección de agua sería ligeramente superior ya que el mismo pozo podría recolectar agua proveniente de las precipitaciones.

4.1.1.4 Membranas selectivas

Las condiciones necesarias para optimizar el rendimiento de los sistemas de membranas incluyen humedades relativas superiores al 60%, oscilaciones térmicas y vientos entre uno y tres metros por segundo, todas ellas se cumplen en el desierto de Tabernas.

Para calcular la cantidad de agua producida con este sistema de selección de membranas necesitamos hallar el flujo de vapor, la cual hallaremos con la Ley de Fick de difusión,

adaptada a las membranas, con la inclusión de la presión de vapor y la permeabilidad de la membrana.

$$j = P_m \frac{\Delta P}{\delta}$$

Fórmula 11. Fórmula de cálculo de flujo de vapor para membranas selectivas.

La permeabilidad de las membranas al vapor depende del tipo de membrana que utilicemos, el grafeno poroso, el MOF-303, el Nafion o la Biomimética. Es por ello, que, para realizar un cálculo estandarizado, utilizaremos membranas biomiméticas, ya que su límite de humedad relativa mínima que es del 30 %, es superada a lo largo de todo el año y, añadido a ello, es de un coste intermedio. En caso de elegir este sistema, se haría un estudio en profundidad más concreto de cada opción existente. La permeabilidad promedio de este tipo de membranas que utilizaremos es de $2.5 \cdot 10^{-6}$ y, los espesores promedios son de 0,001 m.

$$P_{\text{sat}}(T) = 610,94 * e^{\left(\frac{17.625 * T}{T + 243.04}\right)}$$

Fórmula 12. Fórmula de Magnus para el cálculo de diferencia de presiones.

$$P_{\text{vapor}} = HR * p_{\text{sat}}(T_{\text{atm}})$$

Fórmula 13. Cálculo de presión de vapor

Por otro lado, hay que calcular la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana, para ello, aplicaremos la fórmula de Magnus nuevamente. En el lado exterior, en donde hay una temperatura media de 16,3 °C y, una humedad relativa media del 60,09%, nos da una presión de saturación exterior de 1856,3 Pa y, por tanto, una presión de vapor de 1115,5 Pa. Para completar el cálculo diferencial de presiones, hace falta calcular la presión de saturación en el lado interior, para ello, supondremos una superficie fría de temperatura 5°C, lo que nos da una presión de saturación interior de 872,5 Pa. Finalmente, obtenemos una diferencia de presión de 243 Pa.

Sustituyendo estos valores, obtenemos un flujo de vapor de 8,24L/m².

4.1.1.5 Generadores de agua

Para hacer una aproximación de la cantidad de agua producida con una instalación de generadores de agua, basaremos los cálculos en el fabricante español Aquaer y en su modelo Vitae Plus 1.500 y en una disponibilidad de energía de 18,31 MJ/m²/día para sistemas solares eléctricos y, con las condiciones climatológicas más favorables que se dan en los horarios nocturnos.

La ficha técnica del Aquaer Vitae tiene una producción nominal de 1500 L/día, con unas condiciones de 25 °C y, humedad relativa del 60 % un consumo eléctrico de 11,7 kW. El rango de operación es con temperaturas entre los 15-45 °C y, humedades relativas mínimas del 40 %, la cual es superada la gran mayoría del año. Los datos que utilizaremos para el cálculo son los 9,9 °C de media que alcanzamos en horarios nocturnos, junto con la humedad relativa de 85,915%.

Para estimar la producción estimada real nos basaremos en la fórmula de corrección aprobada por el propio fabricante, sustituyendo los datos específicos del desierto de Tabernas, obtenemos una estimación real de producción de 150 litros por unidad.

$$Producción Real = [1\ 500 * (\frac{HR_{real}}{80})] * [e^{\frac{T_{real}-25}{12}}]$$

Fórmula 14. Fórmula corrección de la producción real.

Los resultados son realistas ya que hay una instalación actualmente operativa en regiones de Almería con condiciones similares a las del Desierto de Tabernas, en las que la producción diaria oscila entre los 120-160 L/día.

No obstante, hay que tener en cuenta el consumo eléctrico diario, que sería de 280,8 kWh, para hacer esta instalación sostenible, habría que hacer un estudio acerca de la instalación de paneles solares para obtener la energía necesaria. De todas formas, hay que tener en mente que este análisis es con un generador mediano, podría reducirse el tamaño de tal manera que

se reduzcan los costes energéticos, pero consecuentemente, se reducirían las cantidades producidas.

4.1.1.6 Desecantes

Para el cálculo de la obtención de agua producida con desecantes, hay que tener en cuenta las condiciones nocturnas ($T=9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $HR=85,915\%$) que es cuando ocurre la absorción del agua y, las diurnas ($T=16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) que es cuando tiene lugar la desorción diurna.

Para que ocurra la desorción de manera natural es necesario que las temperaturas alcancen cifras superiores a los 70°C , condición que no se alcanza sin fuentes externas de energía, por tanto, será necesario aportar una fuente adicional que aporte calor para potenciar la desorción del agua.

Basaremos los cálculos en los desecantes del fabricante Munters Mx, suponiendo un área de las ruedas de 1 m^2 , las cuales tienen una masa típica de gel de 50 kg y, con una capacidad de absorción promedio de $0,25\text{ kg}$ de agua/kg de desecante para la humedad relativa dada en el Desierto de Tabernas, procedemos al cálculo del agua absorbida por ciclo con la siguiente fórmula, que nos da un resultado de $12,5\text{ kg}$ y, al ser agua el líquido recolectado, esto equivaldría a $12,5\text{ L}$.

$$m_{H_2O} = \text{capacidad de absorción} * \text{masa de desecante}.$$

Fórmula 15. Fórmula de la capacidad de absorción del total del desecante.

Posteriormente, calcularemos la energía requerida para la regeneración del agua absorbida con la siguiente fórmula y con datos obtenidos de la ficha técnica de Munters que establece $3,5\text{ kWh}$ por kg de desecante, aplicando la fórmula obtenemos una energía requerida de $43,75\text{ kWh}$.

$$Q = m_{H_2O} * (\text{energía requerida para la regeneración/kg})$$

Fórmula 16. Fórmula energía requerida para la regeneración

Para cubrir toda esta energía requerida haría falta un área solar de 17,2 m²/unidad, considerando una eficiencia de los colectores térmicos del 50%.

$$\text{Área solar} = \frac{\text{Energía total requerida (Q)}}{\text{Radiación solar disponible} * \text{Eficiencia del colector}}$$

Fórmula 17. Cálculo del área de paneles solares térmicos

4.1.2 TABLA COMPARATIVA TÉCNICAS

TÉCNICA	PRODUCCIÓN (L/día)
ATRAPANIEBLAS	3,6 L/m ² (Sierra Alhamilla)
	1,66 L/m ² (Desierto de Tabernas)
CONDENSACIÓN RADIATIVA	2,16 L/m ²
POZOS DE ROCÍO	5,52 L/pozo
MEMBRANAS SELECTIVAS	8,24 L/ m ²
GENERADORES DE AGUA (AWG – Aquaer 1500)	150 L/unidad
DESECANTES (Munters MX)	12,5 L/unidad

Tabla 4.1 Tabla comparativa producción de agua

Capítulo 5. ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

En este apartado del trabajo se procederá a la elección de la zona en la que se implementará el sistema que mejor se adapte a las características climatológicas de la región. Realizando un análisis detallado de sus factores meteorológicos.

5.1.1 EL DESIERTO DE TABERNAS, (ALMERÍA, ANDALUCÍA).

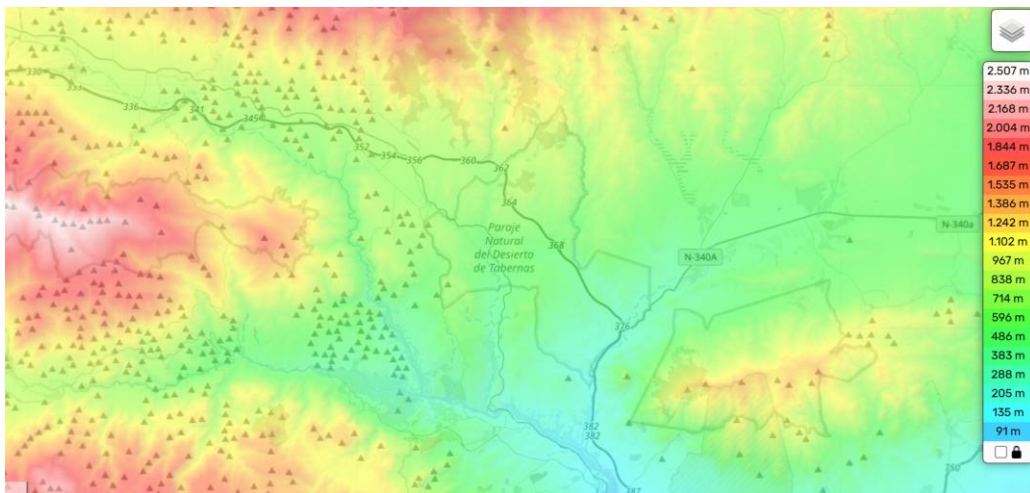


Figura 10. Mapa topográfico desierto de las Tabernas.

La región de estudio elegida para el análisis de implantación de técnicas de recolección de humedad ambiental ha sido el Desierto de Tabernas (Almería, Andalucía, España), ubicado en las coordenadas: (Latitud: 37°05'28'' N – Longitud: 02°18'08'' W), se encuentra entre las Sierras de los Filabres y Alhamilla. El motivo por el cual he escogido esta zona de España ha sido por sus condiciones extremas y su singularidad climática, convirtiéndola en un ambiente natural excepcional para la puesta en marcha de este trabajo de implantación de sistemas de recolección de humedad ambiental. Siendo esta la única zona desértica en Europa reconocida por la UNESCO, presenta parámetros climáticos determinantes para la

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

investigación. Se caracteriza El desierto de Tabernas presenta un clima semiárido, con precipitaciones inferiores a los 250 mm anuales, alta radiación solar y escasez hídrica crónica. Además, el contexto socioeconómico de la región demanda soluciones innovadoras de captación de humedad que superen las limitaciones de los proyectos piloto existentes. La disponibilidad de datos meteorológicos detallados procedentes de AEMET y la red SIAR, unido a las similitudes con otras regiones áridas globales, permite que las conclusiones obtenidas en este análisis puedan extrapolarse a otros entornos con desafíos similares de manera universal. Estos factores convierten al Desierto de Tabernas como un caso de estudio estratégico para avanzar en la sostenibilidad hídrica de zonas áridas.

5.1.2 PARÁMETROS INCLUIDOS EN EL ESTUDIO

Los parámetros clave para evaluar la viabilidad de sistemas de recolección de humedad han sido los siguientes, con datos recogidos de las fuentes previamente mencionadas:

- Humedad relativa máxima, mínima y media, con estos datos podremos determinar qué sistema trabajará de manera óptima para la recolección de humedad ya que esta medida determina la capacidad del aire para liberar agua.
- Temperatura mínima y media, representa en su mayoría temperaturas nocturnas, haciendo posible identificar noches frías en las que la temperatura sea inferior a la temperatura de rocío.
- Acumulación de precipitaciones
- Punto de rocío, nos indica cuándo ocurrirá la condensación natural.
- Radiación solar, clave sobre todo para analizar sistemas solares.
- Velocidad del viento, afecta a la eficiencia de los sistemas de captación de humedad.

5.1.3 DATOS DE SIAR

El sistema de información agroclimática para el regadío (SIAR), gestionado por el ministerio de Agricultura de España, recoge datos meteorológicos en tiempo real desde una red de estaciones distribuidas por todo el territorio español, en nuestro caso, para este análisis hemos usado los datos recogidos desde la estación meteorológica de Tabernas. Con estos datos se ha procedido a realizar un análisis automatizado de los datos del SIAR utilizando herramientas de programación en Python (Jupyter, Anaconda), para así poder extraer patrones, tendencias y correlaciones relevantes para la implantación del sistema más adecuado para con las condiciones dadas en esta región, teniendo en cuenta los rangos óptimos de cada uno de los sistemas estudiados con anterioridad. Se han usado datos para el análisis desde el 2000 hasta el 2025 para poder detectar los posibles efectos del calentamiento global y poder tener en cuenta posibles estacionalidades a lo largo de los años o de las épocas del año para la implantación del sistema más oportuno. Y un análisis paralelo de los datos recogidos únicamente en el último año para poder así identificar anomalías a corto plazo en la región, o sí, por el contrario, los datos están alineados con las conclusiones de las tendencias temporales a largo plazo.

En primer lugar, comenzaremos analizando los parámetros a corto plazo con los datos recogidos en el último año (durante el 2024). Este análisis es fundamental ya que nos proporcionará con información sobre las condiciones climáticas y ambientales más recientes, que son críticas para ajustar el diseño del sistema escogido para poder optimizar su funcionamiento, permitiéndonos además identificar patrones estacionales inmediatos o si ha sido un año con cambios abruptos en el clima habitual de la región. Posteriormente, analizaremos la variación de los parámetros a largo plazo, con los datos recogidos en los últimos 25 años, abarcando datos desde el 2000 hasta el 2025, este estudio es esencial para garantizar que el sistema sea confiable y eficiente a lo largo de los años, teniendo en cuenta así los extremos históricos. Buscaremos identificar estacionalidades, patrones históricos y posibles efectos del cambio climático. Esto nos ayuda a identificar si el último año estudiado ha sido un año atípico, o si, por el contrario, es parte de una tendencia más amplia.

5.1.3.1 ANÁLISIS TEMPERATURAS

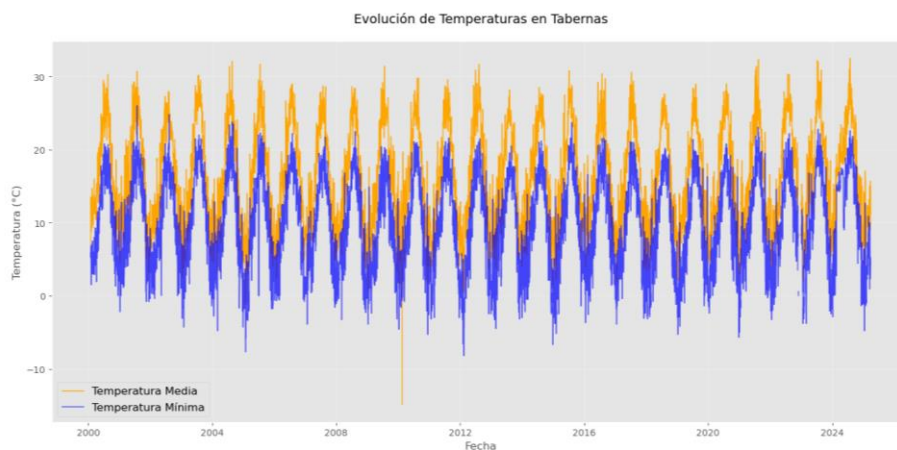


Figura 11. Evolución de Temperaturas en Taberna a lo largo de los años

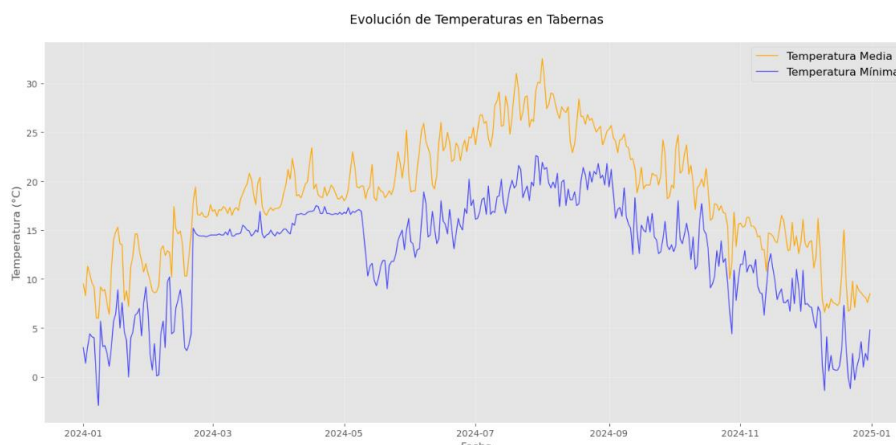


Figura 12. Evolución de Temperaturas en Taberna en el año 2024.

AÑO	Media de temperaturas mínimas	Media de temperaturas máximas	Temp. Máxima absoluta	Temp. Mínima absoluta
2000	10,7°C	17,4°C	30,3°C	0,0°C
2001	10,6°C	17,0°C	30,7°C	-2,2°C
2002	10,3°C	16,6°C	28,0°C	-0,4°C
2003	10,6°C	16,8°C	30,2°C	-4,3°C
2004	10,1°C	16,3°C	32,1°C	-4,8°C

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

2005	9,4°C	16,0°C	31,7°C	-7,7°C
2006	10,5°C	16,7°C	29,0°C	-0,8°C
2007	9,7°C	16,1°C	28,7°C	-3,9°C
2008	9,4°C	15,8°C	28,6°C	-3,3°C
2009	9,1°C	16,4°C	31,4°C	-3,9°C
2010	9,6°C	15,9°C	29,8°C	-5,3°C
2011	9,9°C	16,3°C	29,6°C	-3,2°C
2012	8,9°C	16,0°C	31,7°C	-8,2°C
2013	9,1°C	15,9°C	28,2°C	-4,5°C
2014	9,7°C	16,7°C	28,5°C	-6,7°C
2015	10,1°C	16,6°C	30,8°C	-5,2°C
2016	10,2°C	16,7°C	30,4°C	-3,7°C
2017	9,4°C	16,2°C	30,6°C	-3,9°C
2018	9,3°C	15,8°C	27,6°C	-3,2°C
2019	9,1°C	16,0°C	29,0°C	-5,3°C
2020	9,3°C	16,3°C	29,0°C	-5,7°C
2021	10,0°C	16,4°C	32,3°C	-5,0°C
2022	10,4°C	17,5°C	30,3°C	-3,3°C
2023	10,2°C	17,2°C	32,2°C	-3,8°C
2024	12,6°C	18,5°C	32,5°C	-2,9°C
MEDIA	9,9 °C	16,5°C	-	-

Tabla 5,1 Tabla comparativa de las temperaturas máximas y mínimas del Desierto de Tabernas

Mes	Temp, Mín, Media (°C)	Temp, Media General (°C)
Enero	2,42	8,59
Febrero	3,46	9,73
Marzo	6,00	12,21
Abril	8,29	14,68
Mayo	11,18	18,26
Junio	15,13	22,85
Julio	17,78	25,61
Agosto	18,16	25,36
Septiembre	15,08	21,43
Octubre	11,19	17,35
Noviembre	6,14	12,04

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

Diciembre	3,27	9,17
-----------	------	------

Tabla 5,2 Tabla de temperaturas medias por meses del año en Desierto de Tabernas

El análisis de temperaturas en Tabernas durante los últimos 25 años revela patrones climatológicos estacionales consistentes y tendencias térmicas relevantes para la evaluación del rendimiento de sistemas de recuperación de humedad ambiental. Tras el tratamiento de los datos recogidos, vemos como durante las últimas dos décadas, la temperatura media anual ha oscilado entre los 15,8 °C y los 17,5 °C, con una tendencia ascendiente en los últimos años, siendo 2024 el año más cálido del periodo analizado, con una media de 18,53 °C, lo que representa un incremento notable sobre la media histórica que era de 16,3 °C. Este incremento es coherente con patrones de calentamiento global observados en regiones mediterráneas y, podría tener impactos directos sobre la eficiencia de procesos de recolección de humedad ambiental, por efecto de variaciones en la formación de rocío o evaporación del suelo.

El hecho de que las temperaturas medias se hallan elevado se ha visto afectado ya que tanto las temperaturas máximas medias como mínimas medias, han ascendido progresivamente a lo largo de los años también. Las temperaturas mínimas medias han pasado de valores cercanos a 9,9 °C durante décadas pasadas, a valores entorno a los 12,6 °C en el 2024, indicando una reducción de las noches frías, condiciones que favorecerían la formación de la condensación natural de las gotas de agua recolectadas. Un aumento de las máximas diurnas, sin embargo, favorecen la presencia de humedad relativa en la atmósfera.

El comportamiento térmico mensual, presenta claramente como podemos ver en la segunda tabla, una clara estacionalidad, en donde las temperaturas más elevadas se alcanzan en julio y agosto y, las temperaturas más frías se dan en enero y febrero. Identificar estas estacionalidades es esencial para optimizar las tecnologías específicas.

5.1.3.2 ANÁLISIS HUMEDADES RELATIVAS

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

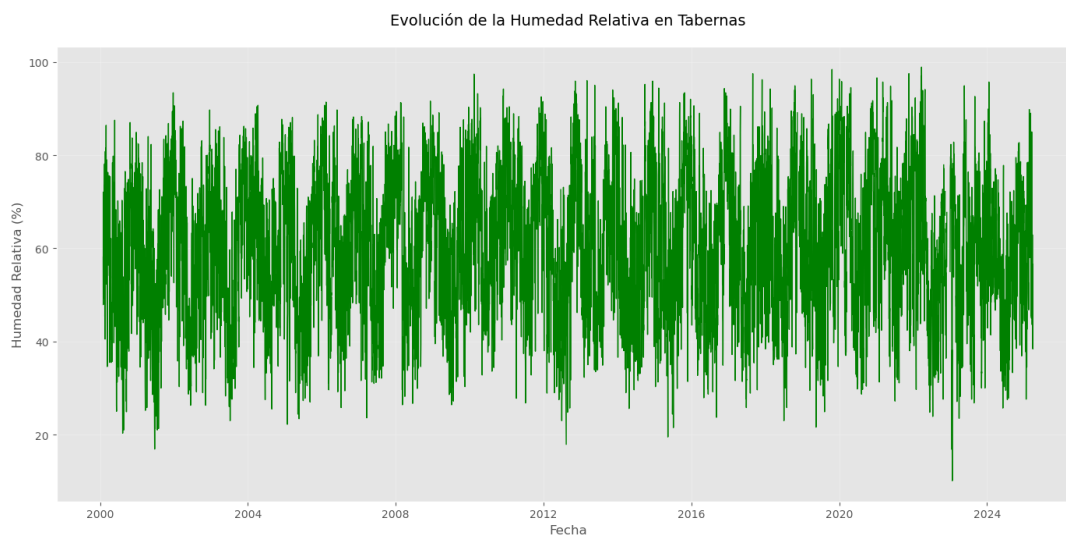


Figura 13. Evolución de Humedad relativa en Taberna a lo largo de los años

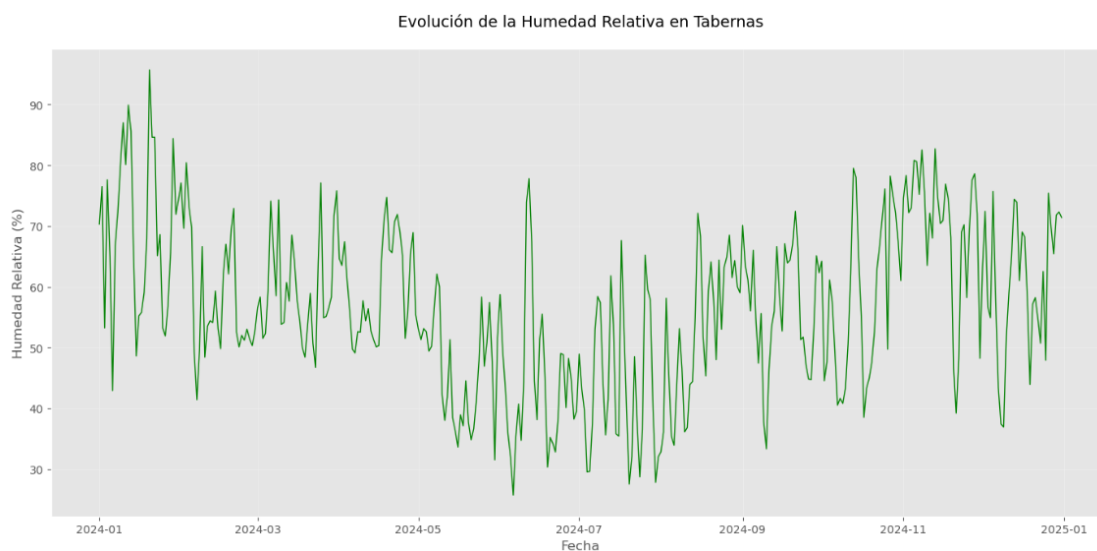


Figura 14. Evolución de Humedad relativa en Taberna a lo largo del año 2024,

Año	HumMed (%)
2000	57,746269
2001	57,825479

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

2002	57,626171
2003	58,132329
2004	60,452732
2005	57,614050
2006	61,257064
2007	61,122928
2008	62,047268
2009	59,167671
2010	63,880274
2011	64,932877
2012	59,438202
2013	60,189589
2014	58,334795
2015	62,224932
2016	59,523497
2017	60,155616
2018	60,997708
2019	59,525205
2020	63,291257
2021	63,688219
2022	57,379257
2023	59,085205
2024	56,587978

Tabla 5,3 Humedad media Desierto de Tabernas a lo largo de los años

	HumMin (%)	HumMed (%)	HumMax (%)
Mes			
1	37,471871	66,720258	88,832258
2	35,692779	63,831608	87,882240
3	34,929104	61,136149	86,327205
4	33,174866	58,773431	85,717623
5	28,871094	54,286866	83,618075
6	24,562332	47,578581	77,214037
7	23,699612	49,069290	80,056645
8	26,405752	52,973725	82,521438
9	33,617089	62,072133	87,840133
10	37,559302	66,547416	90,164599
11	39,346888	68,062759	89,721793
12	41,259892	70,716420	91,118573

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

Tabla 5,4 Tabla humedad relativa mínima/media/máxima Desierto de Tabernas por meses,

En el análisis de la humedad relativa en el desierto de Taberna, fundamental en la caracterización climática por su impacto directo en procesos de evaporación, disponibilidad hídrica del suelo y, por su eficiencia en la captación de la humedad atmosférica. El análisis de los últimos 25 años releva un comportamiento oscilante, con valores comprendidos entre 56,6% y 64,9%.

Se observa una tendencia general al aumento de la humedad relativa media entre los años 2000 y 2001, habiendo en el 2000, una humedad relativa del 57,7% y, en el 2021 del 63,7%, evidenciando una fase húmeda sostenida durante ese periodo. Sin embargo, se puede observar cómo seguidamente, en el 2022 hay un descenso abrupto de las humedades relativas nuevamente, alcanzando cifras de 57,4%. Pese a que en años posteriores haya habido una recuperación parcial de la misma ($\approx 59\%$), no se ha llegado a los valores pico alcanzados anteriormente, en 2024 fue un año crítico siendo este mismo el año más seco del registro, con un nuevo mínimo de 56,6%.

Desde un enfoque mensual, observamos máximos invernales en los meses de diciembre y enero, 70,7% y 66,7% respectivamente y, mínimos estivales durante junio y julio, con humedades relativas de 47,6% y 49,1% respectivamente.

Con base en estos patrones, se recomienda optimizar el diseño y la operación del sistema de recolección de humedad ambiental en los meses de humedad relativa intermedia. Evitando los extremos, ya sean picos altos, o picos bajos, que puedan llegar a generar insuficiencias o saturaciones en el sistema. Además, en los meses en los que la humedad relativa alcanza valores máximos sería conveniente maximizar la producción de agua ya que son indicadores de los días con mayor potencial para condensación. Por el contrario, en meses con humedades relativas mínimas, es crucial considerar si el sistema requiere de un umbral mínimo para su correcto funcionamiento.

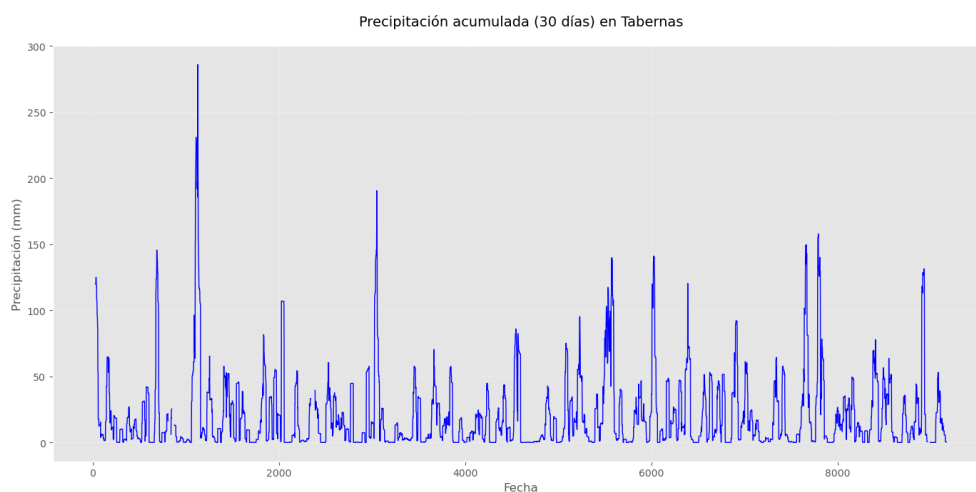
En conclusión, los meses idílicos para implementar sistemas pasivos de recolección de humedad atmosférica abarcan desde noviembre hasta marzo, periodo en el que la humedad

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

relativa mensual, en promedio, supera el 65%, proporcionando condiciones óptimas para la generación de agua a partir del vapor atmosférico.

El valor promedio a lo largo de los años es de 60,08906% y será con el que trabajemos a la hora de realizar los cálculos generales correspondientes ya que, pese a que 2024 ha sido un año más seco de lo normal, vemos como en los últimos años se estaba volviendo a los valores estándar observados a principios de la época estudiada. Para análisis concretos de optimización de los sistemas, utilizaremos el valor promedio de los meses entre noviembre y marzo, que es de 66,642%.

5.1.3.3 ANÁLISIS PRECIPITACIONES



ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

Figura 15. Precipitación acumulada (30 días) en Taberna a lo largo de los años

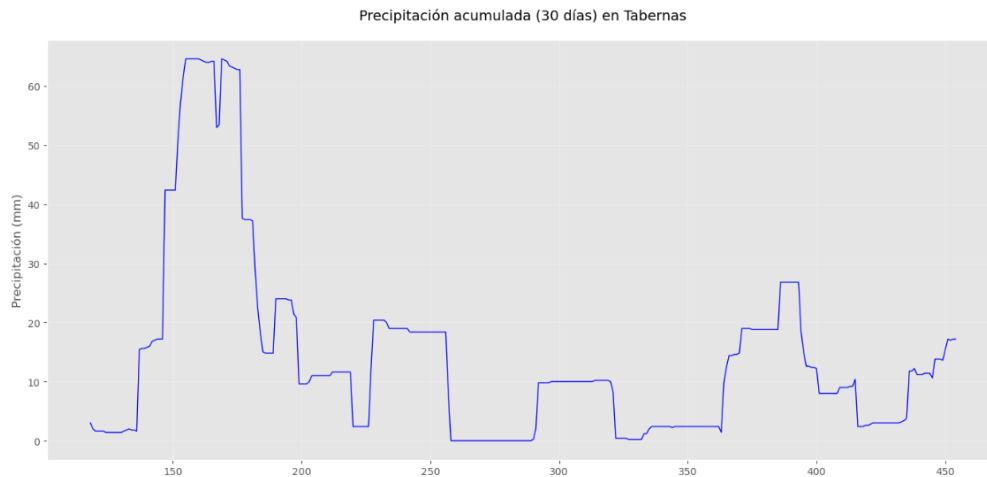


Figura 16. Precipitación acumulada (30 días) en Tabernas a lo largo del año 2024

Año	Precipitación anual (mm)
2000	251,8
2001	212,6
2002	234,1
2003	351,0
2004	297,6
2005	143,6
2006	316,8
2007	296,8
2008	297,8
2009	264,6
2010	416,0
2011	211,8
2012	166,0
2013	176,8
2014	128,4
2015	212,6
2016	248,0
2017	159,6
2018	233,1
2019	247,0
2020	190,4
2021	275,2

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

2022	460,0
2023	253,2
2024	172,4

Tabla 5,5 Precipitaciones acumuladas a lo largo de los años en el Desierto de Tabernas

Mes	Precipitación
3 (marzo)	1001,3
11 (noviembre)	772,8
10 (octubre)	740,2
12 (diciembre)	696,5
9 (septiembre)	658,0
4 (abril)	651,4
5 (mayo)	628,1
1 (enero)	487,0
2 (febrero)	451,4
6 (junio)	129,4
8 (agosto)	121,9
7 (julio)	21,2

Tabla 5,6 Precipitaciones en Desierto de Tabernas ordenados de manera descendente por meses,

El análisis de las precipitaciones de la región es fundamental ya que no solo humedece el suelo, sino que incrementa la humedad relativa del aire de forma temporal, al evaporarse parte del agua tras la precipitación, favoreciendo de esta manera las condiciones óptimas para procesos de captación de humedad atmosférica.

Pese a que el Desierto de Tabernas se clasifique como una región semiárida, ha mostrado una notable variabilidad interanual en las precipitaciones acumuladas, con un mínimo registrado en 2014 de 128,4 mm, hasta un máximo de 460,0 mm en 2022. Este amplio rango de precipitaciones denota un régimen climático caracterizado por eventos esporádicos y puntuales. Podemos observar tanto en los gráficos como en las tablas de datos, que años muy húmedos, son interrumpidos por años muy secos, lo que nos indica que la región no está marcada por una tendencia, sino por picos cíclicos impredecibles.

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

Añadido a ello, se ve como no hay una correlación directa entre los días de lluvias con la cantidad de agua precipitada, por tanto, la intensidad de lluvia varía considerablemente, mostrando que hay lluvias dispersas de diferente intensidad, habiendo lluvias torrenciales y lluvias sin apenas aportes de agua.

Sin embargo, al hacer un análisis mensual, sí que podemos identificar una estacionalidad, en la que hay mayor concentración de precipitaciones en los meses durante el otoño y el invierno, con mayores picos en marzo, sugiriendo borrascas tras la finalización del invierno, y otros picos secundarios en los meses de octubre-noviembre, típico en regiones del mediterráneo, y mínimos absolutos en julio, con precipitaciones prácticamente nulas.

Analizando el último año de registro, vemos como es uno de los cinco años más secos del registro analizado, añadido a ello, no solo ha sido uno de los meses con precipitaciones más bajas de manera absoluta, sino que también sus meses han estado muy descompensados, marzo de 2024 tuvo máximos históricos en el periodo analizado, sin embargo, tuvo una sequía otoñal severa en comparación con los mismos meses en otros años pasados.

Esta irregularidad y lluvias esporádicas hacen complicada la implementación de sistemas pasivos de captación de humedad ambiental, es por ello, que es un parámetro que vigilar cuidadosamente a la hora de elegir el sistema más adecuado.

Los valores con los que realizaremos los cálculos para analizar el funcionamiento del sistema, será el promedio de los últimos 25 años ya que al haber no estar marcado por una tendencia sino por cambios abruptos inesperados, sería lo más representativo de la región; este valor es de 243,85 mm, por supuesto, si queremos analizar el rendimiento concreto de alguna época del año, lo haremos con los promedios de los meses correspondientes analizados.

5.1.3.4 ANÁLISIS VELOCIDAD DEL VIENTO

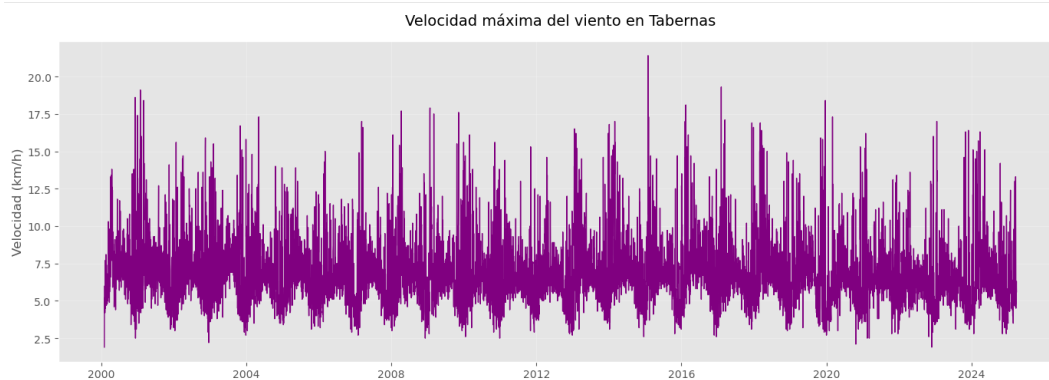


Figura 17. Velocidad máxima del viento en Tabernas a lo largo de los años,

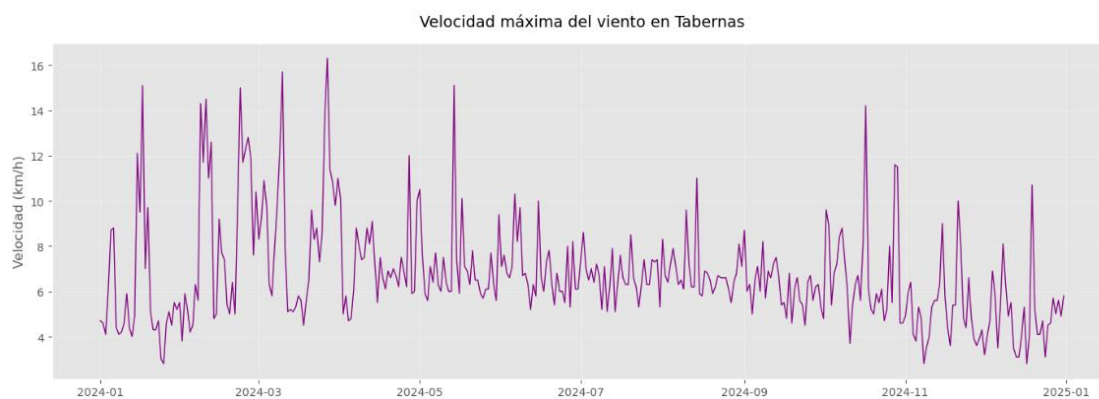


Figura 18. Velocidad máxima del viento por meses en Taberna en el año 2024,

Año	Velocidad máxima (km/h)
2000	7,321493
2001	7,301644
2002	7,038292
2003	7,303836
2004	6,738251
2005	6,886226
2006	6,626039
2007	6,671823
2008	6,975683
2009	7,040822
2010	6,90411
2011	6,611507

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

2012	6,547339
2013	7,287671
2014	7,298904
2015	6,867671
2016	7,52377
2017	6,830411
2018	7,271781
2019	6,987397
2020	6,415301
2021	6,851781
2022	6,38022
2023	6,351374
2024	6,743989

Tabla 5,7 Velocidades medias a lo largo de los años en el Desierto de Tabernas,

El análisis de la velocidad del viento en los últimos 25 años revela como habiendo una ligera tendencia al descenso progresivo, hay una dinámica moderadamente oscilante, sobre todo de las velocidades máximas del viento, vemos como sin haber desviaciones extremas, hay fluctuaciones notables en los valores de estos. En 2020, la velocidad media se situaba en 7,32 km/h, uno de los valores más elevados de la serie. En contraste, en 2023, se alcanzó el valor más bajo registrado y, pese a que en 2024 hubo un ligero repunte, sus valores siguen estando por debajo de la media histórica. Este patrón nos indica la tendencia a la reducción en la velocidad del viento, con un comportamiento más calmado en los últimos años, siendo este dato beneficioso para las técnicas de recolección de humedad atmosférica pasivas.

El aire es esencial no solo para transportar masas de aire, que, en nuestro caso concreto de estudio, resulta de gran interés ya que contienen las partículas de agua, sino que, es esencial para homogeneizar la temperatura superficial de la región. Lo óptimo para cualquier sistema son vientos bajos-moderados que colaboren en la renovación de vapor de agua y faciliten su aprovechamiento por los sistemas de captación, ya que permiten el contacto continuo sin la pérdida excesiva de vapor.

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

En el caso del viento, el valor de la velocidad del viento que utilizaremos para el análisis del sistema será el promedio de los últimos cinco años para ser más precisos con el cálculo ya que, como bien se ha comentado, estamos actualmente en una tendencia al descenso de las velocidades. De esta manera, el valor usado será de 6,621677 km/h, o en el sistema internacional, 1,839 m/s.

5.1.3.5 ANÁLISIS RADIACIÓN SOLAR

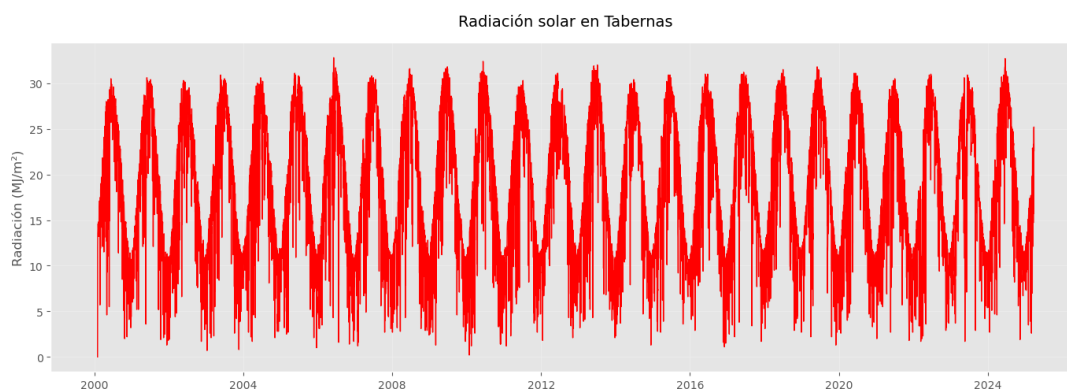


Figura 19. Radiación solar en Tabernas a lo largo de los años

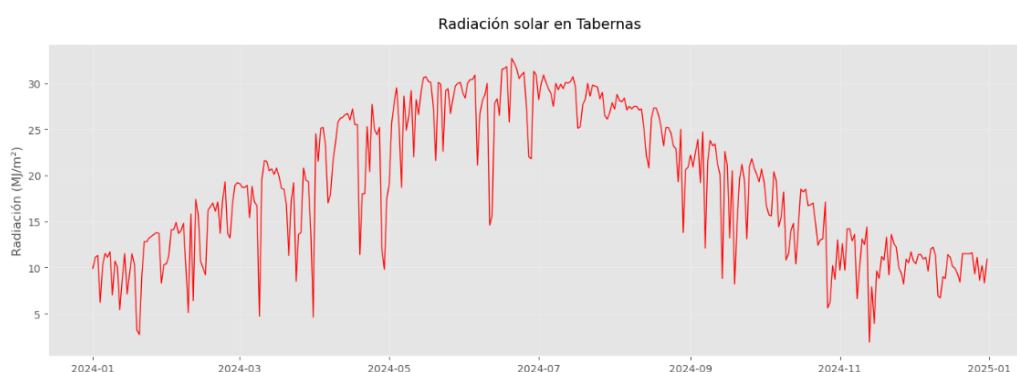


Figura 20. Radiación solar en Tabernas a lo largo del año 2024,

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

Año	Radiación Solar media (MJ/m ²)
2000	18,82
2001	17,87
2002	18,10
2003	18,05
2004	17,98
2005	19,06
2006	17,86
2007	18,08
2008	18,21
2009	18,63
2010	18,11
2011	17,75
2012	18,69
2013	18,68
2014	18,69
2015	18,28
2016	18,33
2017	19,27
2018	18,65
2019	19,22
2020	18,31
2021	17,77
2022	17,67
2023	18,69
2024	18,99

Tabla 5,8 Radiaciones solares medias en Desierto de Tabernas a lo largo de los años

Durante el periodo 2000-2024, nos encontramos con una gran estabilidad en los valores de radiación solar media anual en Tabernas, con grandes oscilaciones estacionales, que reflejan un entorno climatológico constante. Con una media general de 18,31 MJ/m², el desierto de Tabernas se posiciona como uno de los entornos más irradiados de Europa, condición que favorece su selección para pruebas de tecnologías solares. A la hora de implementar el sistema escogido, habría que tener en cuenta que, durante los meses de mayo a septiembre, está aumenta considerablemente con respecto al resto de los meses del año.

5.1.3.6 MATRIZ CORRELACIÓN VARIABLES

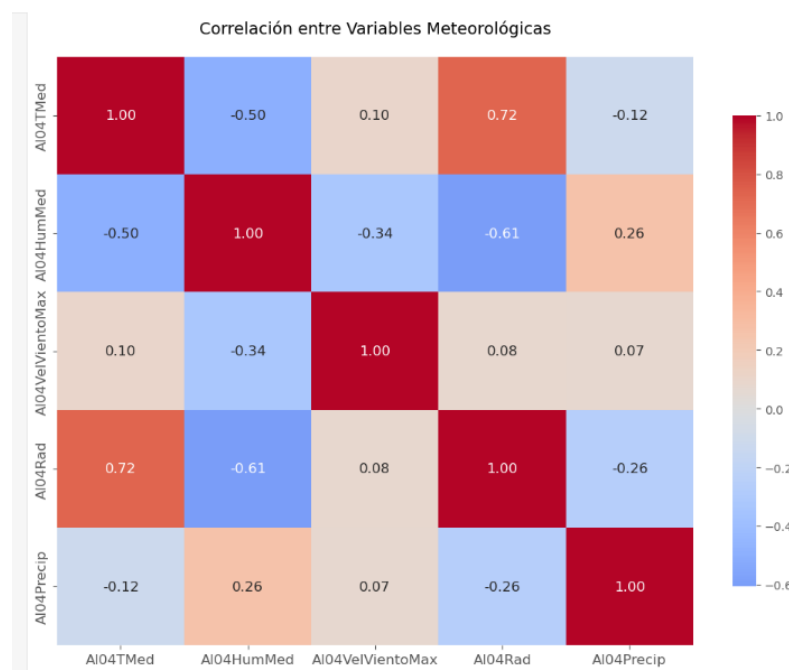


Figura 21. Correlación entre variables meteorológicas a lo largo de los años

La matriz presenta coeficientes de correlación de Pearson, entre cinco variables, en las que se indica el grado de relación lineal entre pares de variables, siendo +1 una correlación positiva perfecta, -1, una correlación negativa perfecta y 0 la ausencia de correlación lineal, Las variables que se analizarán en esta matriz son las analizadas individualmente con anterioridad, que son: Temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación y precipitaciones.

De esta matriz de correlación podemos extraer la correlación entre la temperatura y la humedad relativa, ideal para identificar cuando se dan las condiciones óptimas para la condensación y, por tanto, la recolección de la humedad relativa. Observamos que existe una relación moderada y negativa de un -0,5, corroborando así el comportamiento esperado según el principio termodinámico de la psicrometría que establece que, al aumentar la temperatura ambiente, la humedad relativa disminuye. Este patrón limita, por tanto, las noches cálidas como candidatas para la condensación, ya que el aire caliente diluye el

ANÁLISIS ZONA A IMPLEMENTAR EL PROYECTO

contenido de vapor sin saturarse. Las instalaciones han de priorizar la eficiencia térmica nocturna, maximizando la capacidad de enfriarse por debajo del aire ambiente, a su misma vez, se debe tener en consideración las épocas del año en las que se den las condiciones atmosféricas más frías, en las que aumentan la probabilidad de alcanzar el punto de rocío.

También podemos inferir la correlación entre la humedad relativa y las precipitaciones, que es una correlación en este caso débil y positiva, de un $r=0,26$. Esto nos indica la ausencia de dependencia directa entre las precipitaciones y la eficiencia de recolección de humedad atmosférica, es por ello, que hay que tener presente que esta misma será independiente del régimen pluviométrico.

De la relación entre la humedad relativa y la velocidad del viento, obtenemos una relación moderada y negativa de $r=-0,34$, si bien es cierto que vientos fuertes suelen estar asociados a masas de aire secas y que son necesarios para el transporte de vapor, estos mismos pueden causar la dispersión de las microgotas o incluso llegar a secar las superficies. Es por ello, que el sistema ha de situarse en un lugar resguardado de vientos excesivos y, en caso de no ser posible, deberán ser protegidos, permitiendo únicamente la circulación moderada del mismo.

Seguidamente, obtenemos un coeficiente fuerte y negativo de $r=-0,61$ de correlación entre la radiación solar y la humedad relativa. Este valor nos indica que la evaporación durante el día será facilitada por la radiación, sin embargo, dificulta el enfriamiento nocturno necesario para la condensación. Es por ello, que las estructuras han de estar aisladas térmicamente o reflejar radiación durante el día, es por ello, que es recomendable usar superficies con baja emisividad infrarroja y alta emisividad al cielo nocturno, para perder calor por las noches.

En conclusión, dado el entorno hostil en Tabernas (alta radiación, baja humedad y viento seco), si bien es cierto que es recomendable usar sistemas híbridos, es posible la aplicación de sistemas pasivos que estén adaptados al contexto climático de la región. Siendo algunas de estas adaptaciones la protección frente al viento fuerte, la minimización de acumulación térmica durante el día, o complementarla con otras fuentes alternativas.

Capítulo 6. SISTEMA ESCOGIDO PARA IMPLANTAR

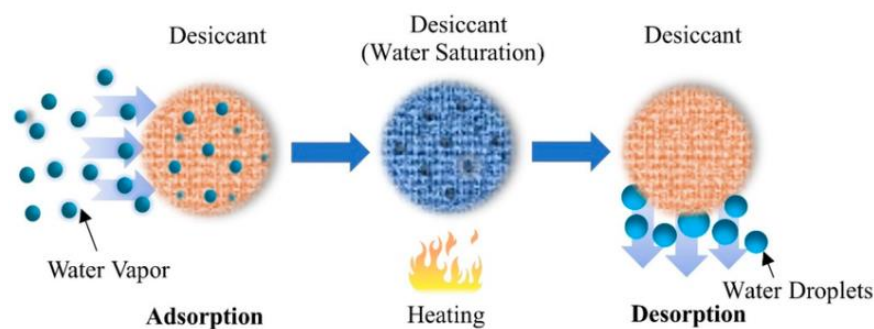


Figura 1. Diagrama de desecantes basado en la humedad ambiental (Research Gate)

El sistema que se ha escogido para implantar en el Desierto de Tabernas será un sistema híbrido compuesto por desecantes con materiales higroscópicos y un condensador eléctrico. Esta elección por supuesto, está respaldada por un análisis riguroso técnico el cual ha tenido en cuenta las condiciones climatológicas locales, los requerimientos de cada tecnología y su eficiencia integral. En el Desierto de Tabernas, esta elección se ha hecho debido a su elevada compatibilidad basadas en las condiciones climáticas de la región y el potencial de adaptabilidad del propio sistema en sí, su sostenibilidad y eficiencia climática.

En primer lugar, el Desierto de Tabernas presenta una compatibilidad climática fuerte con el sistema escogido, debido a las condiciones típicas de clima semiárido, con temperaturas medias anuales de aproximadamente 16,3 °C, humedad relativa media del 60 %, valores de radiación solar próximos a los 18,31 MJ/m² y velocidades de viento medio de 1,83 m/s. Todos estos valores encajan dentro de los rangos óptimos operativos de los sistemas híbridos desecante-condensador.

SISTEMA ESCOGIDO PARA IMPLANTAR

Los materiales desecantes, como zeolitas o geles de sílice, funcionan de manera óptima con humedades relativas superiores al 40%, haciendo posible la captura de vapor de agua en su fase de absorción. Seguidamente, mediante una fuente de energía externa, podría ser calor solar para aprovechar la radiación solar del Desierto, se induce la desorción del vapor previamente absorbido y este es conducido a una cámara de condensación forzada. Esta sinergia de tecnologías hace posible la producción continua de agua, incluso con condiciones climatológicas variables, sin la necesidad de que haya picos o bien de temperatura o bien de humedad relativa, como son necesarios para el funcionamiento de los sistemas puramente pasivos.

La elevada radiación presente en el Desierto de Tabernas proporciona una fuente térmica ideal para la regeneración del desecante posterior a la absorción del vapor. Esto nos reduce el requerimiento de energía externa, a la vez que nos mejora el rendimiento exergético del sistema. Por último, las velocidades medias presentes en la región, de 1,83 m/s, son ideales para favorecer el intercambio de masa entre el aire ambiental y la superficie desecante, mejorando la captación sin generar turbulencias excesivas.

La mayor ventaja que presenta este sistema mixto frente a otros sistemas es que, a diferencia de los sistemas pasivos como los pozos de rocío o los atrapanieblas, cuya eficiencia óptima está limitada a condiciones climatológicas muy concretas como podrían ser, noches especialmente frías, cielos despejados o humedades relativas superiores al 70%, el sistema híbrido ofrece mayor tolerancia operativa, garantizando un funcionamiento robusto independientemente de las condiciones climatológicas momentáneas, ya que, como hemos analizado en secciones previas, pese a que no haya ninguna tendencia marcada a lo largo de los años, sí que hay grandes ciclos estacionales que hacen que los parámetros oscilen dependiendo de la época del año en la que nos encontremos. Este sistema puede llevar a cabo la absorción de vapor requerida durante el día y condensar mediante ciclos nocturnos programados, lo cual hace posible la estabilización de producción de agua. Por otro lado, es mejor que otros sistemas puramente activos como podría ser los generadores de agua, ya que habría un alto consumo energético y, por tanto, conllevaría gastos muy elevados,

Añadido a ello, el uso de desencantes en fase sólida hace posible la reducción del volumen de aire necesario para producir apreciables cantidades de agua, lo que conlleva directamente a una disminución de los costes energéticos asociados al tratamiento de aire. Por otro lado, el hecho de que sea posible acoplar condensadores termoeléctricos de bajo consumo, siendo estos alimentados con energía solar fotovoltaica, hace que el proyecto tenga mayor escalabilidad y autonomía.

En cuanto a la fiabilidad y duración se refiere, estos sistemas pueden ser diseñados con materiales resistentes a la corrosión, de bajo mantenimiento y con configurados en módulos para facilitar su instalación y reposición en zonas aisladas.

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

La viabilidad de cualquier proyecto tecnológico innovador se fundamenta en un análisis económico riguroso, el cual no solo tenga en cuenta los gastos iniciales, sino también los costes operativos y de mantenimiento a lo largo de su vida útil. En esta sección, llevaremos a cabo un desglose detallado abarcando desde la adquisición de los materiales, hasta los gastos de operación, de tal manera que podamos ofrecer una perspectiva integral de su rentabilidad. El análisis económico que llevamos a cabo se enfoca únicamente en la mejor opción de cada subapartado, considerando “mejor opción”, como aquella que ofrece una combinación óptima de eficiencia, durabilidad y relación calidad-precio dentro de las posibles opciones del mercado, no tiene por qué ser el más caro, sino el que mejor rendimiento a largo plazo ofrezca.

6.1.1 COSTES DE MATERIALES E INFRAESTRUCTURA

La inversión inicial conlleva la adquisición de materiales de alto rendimiento que aseguren la eficiencia y durabilidad del sistema a lo largo de los años. Los materiales que habrá que adquirir en primera instancia son los siguientes:

- Paneles solares térmicos

SISTEMA ESCOGIDO PARA IMPLANTAR

Con el fin de maximizar la eficiencia energética, haremos una combinación de tanto colectores solares térmicos de tubos de vacío, como de paneles fotovoltaicos monocristalinos de última generación.

➤ Paneles solares térmicos para la regeneración del desecante,

Para la regeneración de los desecantes, optaremos por los colectores de tubos de vacío con tecnologías de tubos ya que son los que mayor eficiencia ofrecen, incluso con baja irradiancia, es por ello, que son esenciales para la regeneración de los desecantes, especialmente, en ciclos estacionales con condiciones meteorológicas menos favorables.



Figura 2. Colector de tubos de vacío Vitosol 200-TM,

El fabricante escogido para llevar a cabo la instalación de estos es Viessmann con su producto Vitosol 200-TM, sus tubos de vacío se rigen por el principio de heatpipe, larga vida útil y protección contra el sobrecalentamiento. Esta fabricada con una unión seca, lo que hace posible que los tubos puedan montarse o sustituirse de manera rápida incluso cuando la instalación está llena, de cara al mantenimiento a lo largo de los años esta es una ventaja fundamental frente a otros fabricantes. Añadido a ello, los tubos pueden inclinarse hasta los 45° sin aumentar el sombreado con el fin de optimizar la recolección solar.

El precio de adquisición de estos tubos de vacío es de 450 €/unidad, por lo que para llevar a cabo una instalación de 100 m², supondría un coste de 45,000 €.

- Materiales desecantes

La mejor opción disponible de desecantes son las zeolitas sintéticas, que, pese a que sean ligeramente más caras que los geles de sílice, estas ofrecen mayor capacidad de absorción pese a que haya humedades relativas inferiores, lo que otorga mayor estabilidad de producción de agua. Añadido a ello, también ofrecen estabilidad térmica, lo que facilita los ciclos de regeneración de estos, lo que optimiza su vida útil sin degradación significativa.

El proveedor con el que llevaremos a cabo la instalación es “Zeochem” con sus desecantes tipo 4 A. El coste de un kilo de zeolitas oscila alrededor de los 50€. En nuestra instalación harían falta 150 kg, por lo que el precio final sería de unos 7.500€.

- Condensador termoeléctrico (compresor)

Una vez el vapor de agua ya ha sido desorbido, es necesario un condensador, para hacerlo de la mejor manera posible, es necesario un sistema de refrigeración por compresión ya que es la opción más eficaz y sostenible del mercado. Utilizaremos un sistema de refrigeración por compresión de vapor con refrigerante ecológico, de bajo consumo energético, estos ofrecen mejor COP que aquellas unidades Peltier, por lo que se reduce el consumo eléctrico. El fabricante con el que llevaremos a cabo la instalación será Danfoss. Para un sistema dimensionado que sea capaz de procesar 150 L/día, hará falta un equipo de alta eficiencia por lo que el coste aproximado del mismo será de 17.000€, para garantizar la calidad requerida.

- Estructura de soporte

La resistencia a las condiciones ambientales de los materiales de la estructura de soporte es esencial para garantizar una larga vida útil. El precio de esta estructura varía ya que suelen realizarse a medida, pero el coste aproximado por metro cuadrado ronda los 170 €/m², por lo que se estima un coste total de 18.000€. La mejor opción sería construir la

estructura de acero inoxidable AISI 304, del fabricante Inox Ibérica, que pese a ser más costoso que el aluminio, ofrece mayor resistencia en ambientes externos y aporta mayor robustez estructural, lo que garantizaría la estabilidad de los paneles y los módulos de desecantes.

- Sistema de almacenamiento y filtración de agua

La correcta elección del sistema de almacenamiento es fundamental para garantizar la calidad del agua producida. Es por ello, que hemos elegido tanques de polietileno de alta densidad (HDPE), con certificaciones para agua potable, y que contiene protección UV, Para un volumen de producción de agua elevado como es el caso, se recomienda un diseño modular para facilitar el transporte e instalación de este. Tienen un sistema de filtración clasificada en tres etapas, la primera es un filtro de sedimentos, con rejillas de cinco micras, posteriormente, se aplica un filtro de carbón activado en bloque, para eliminar tanto olores y sabores, como cloro residual en caso de aplicar y, finalmente, una lámpara UV, para llevar a cabo la desinfección bacteriológica, asegurando la potabilidad del agua, incluso sin necesidad de aplicar productos químicos.

Para llevar a cabo la instalación de los propios tanques, nos fijaremos del fabricante “Snyder Industries”, por otro lado, para la aplicación de la filtración UV, utilizaremos los filtros del proveedor “TrojanUV”. El coste total del sistema de almacenamiento, junto con la desinfección del agua rondaría por los 9.100 €, que desglosado se ve como 4.000 € del propio tanque en sí y 5.100€ de los filtros de desinfección.

6.1.2 COSTES DE INSTALACIÓN Y LOGÍSTICA

Es imprescindible contratar un buen servicio de instalación para garantizar el rendimiento y la seguridad del sistema, a la par que la validez de las garantías de los productos instalados. Lo mejor sería contratar a una empresa de ingenieros que hayan llevado a cabo una instalación similar con anterioridad, para garantizar la configuración óptima, además de las conexiones eléctricas y de fluidos y que realicen las pruebas de funcionamiento correspondiente. Los costes de instalación incurrirían los gastos de transporte y seguros de los

materiales adquiridos, la mano de obra de los técnicos, la maquinaria en caso de ser necesaria para movilizar los materiales, las pruebas y la puesta en marcha del sistema y, por último, los permisos y las licencias correspondientes. Debido a la complejidad de obtención de los costes reales de los gastos de instalación, por la complejidad del sistema, se supondrá un 15 % del subtotal de los materiales, es decir, 15.855€.

6.1.3 COSTES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Un correcto mantenimiento del sistema es esencial para prolongar la vida útil del sistema, asegurando su rendimiento óptimo. Para conservar el correcto funcionamiento de cada componente es esencial llevar a cabo las siguientes modificaciones a lo largo de los años.

En primer lugar, el reemplazo de los desecantes cada cuatro años para garantizar la capacidad de absorción de los materiales, esto supondría un total de 2.500€, siendo el coste por reemplazo de 833,33€.

Añadido a ello, una limpieza anual o incluso semestral con la misma empresa instaladora, además de una limpieza superficial mensual llevada a cabo por un técnico, que compruebe a su misma vez los conexiones eléctricos y de fluidos, la comprobación de filtros y rayos UV y los calibrados que hagan falta. Este gasto rondaría los 150 € mensuales, lo que significaría un gasto anual de 1.800€ y, en 15 años, el total de la vida útil, de 27.000€.

Por último, hay que tener en cuenta el posible coste energético residual, en el mejor de los casos, teniendo almacenamiento para el exceso de energía solar producida, sería nulo el coste. Sin embargo, para tener en cuenta posibles necesidades puntuales, o de respaldo, estimaremos un coste de 200 € anuales, lo que significaría un gasto a lo largo de la vida útil del sistema de 3.000 €, que garantizará la continuidad operativa independientemente de la circunstancia en la que nos encontremos.

6.1.4 VIDA ÚTIL Y AMORTIZACIÓN

La elección de materiales y estructuras de alta calidad tiene un impacto directo sobre la vida útil del sistema y, por tanto, en la amortización de los costes del sistema.

SISTEMA ESCOGIDO PARA IMPLANTAR

La vida útil del sistema varía según el producto, los paneles solares tienen una vida útil media de 25 años, las estructuras de acero inoxidable, de más de 30 años, los componentes electromecánicos, como puede ser el compresor, de 15 años (llevando a cabo el mantenimiento adecuado), los materiales desecantes, de 4 años por ciclos, pero las cámaras de absorción/desorción son de mayor durabilidad. Por tanto, haciendo una ponderación global de los materiales, la vida útil del sistema es de entre los 15 a los 20 años, teniendo en cuenta una base prudente, realizaremos los cálculos con 15 años de vida útil.

- Coste total estimado a 15 años:
 - Inversión inicial total = (Subtotal materiales + costes instalación) = 105.700€
+ 15.855€ = 121.555€
 - Gastos operativos a 15 años
 - Reemplazo de desecantes (teniendo en cuenta tres reemplazos en 15 años) = 2.500€
 - Mantenimiento anual = 27.000€
 - Coste energético residual = 3.000€
 - TOTAL, GASTOS OPERATIVOS A 15 AÑOS = 32.500€
 - TOTAL, COSTE ACUMULADO A 15 AÑOS = 154.055€
- Producción estimada de agua a 15 años
 - Producción total = (150 L/día) * (365 días/año) * 15 años = 821.250 L.
- Coste por litro de agua producido = (154,055€) / (821,250L) = 0,18758 €/L.

Este coste se mantiene competitivo y se encuentra en los límites inferiores, gracias a la mayor vida útil de los materiales, gracias a la inicial inversión en componentes de mayor calidad.

6.1.5 COMPARATIVA CON COSTES ACTUALES DEL AGUA EN TABERNAS



Figura 3. Transporte del abastecimiento de agua mediante camiones cisterna en Almería,

La elección de componentes de alta calidad en una mayor inversión inicial no solo reduce el mantenimiento requerido y mejora la fiabilidad del sistema, sino que también supone una ventaja económica frente a las vigentes alternativas que actualmente hay en el Desierto de Tabernas para la obtención del agua.

Actualmente las opciones más viables son el transporte de agua en camiones cisterna, procedentes de manantiales próximos a Almería en nuestro caso en concreto, la empresa en la que basaremos nuestros cálculos será agua de Araoz, que distribuye agua semanalmente a diferentes localidades próximas a la ciudad de Almería. Esta tiene un costo de 0,03€/L, sin embargo, dependemos de la disponibilidad de agua en los manantiales y de camiones que puedan transportarnos el agua hasta nuestra localidad, añadido a ello, considerando el recargo por distancia o por volumen pequeño, este podría aumentar hasta los 0,10€. Por tanto, en nuestro caso de análisis que es la propuesta de soluciones económicas frente a épocas de sequía nos otorga la independencia absoluta para producir agua sin importar la disponibilidad de agua almacenada, es decir, nos da resiliencia climática, reduce la huella de carbono, ya que el transporte en camiones requiere de combustión fósil, mientras que nuestro sistema al tener un sistema solar implantado tiene una huella ambiental mínima una vez

instalada. Añadido a ello, en caso de necesitar agua en épocas de emergencia estas aumentan su precio hasta los 2 €/Litro.

6.1.6 SUBVENCIONES Y FINANCIACIÓN

Las subvenciones a las que podemos aplicar con nuestra propuesta de proyecto son las siguientes:

En primer lugar, a fondos europeos tal y como “LIFE-Climate action sub-programme”, vigente hasta el 2027, en la que podríamos obtener una subvención de hasta el 60% del coste total del proyecto, por tratarse de un proyecto que utiliza energía limpia y renovable y trata sobre la gestión del agua. En caso de obtener esta subvención, el subtotal de la instalación inicial se nos quedaría en 36.466,5 €; por tanto, el coste acumulado tras 15 años, teniendo en cuenta los gastos operativos, nos quedaría en 68.966,5 €; por lo que el coste por litro de agua quedaría en 0,0839 €/L. Además de este fondo, existen otros fondos europeos de ayudas similares, tal y como el DEFER/ERDF, el NextGenerationEU, o mecanismo conectar Europa. Por tanto, en caso de recibir alguna de estas subvenciones, nos haría no solo completamente independientes frente a posibles futuras sequías, sino que, en épocas de funcionamiento normal, podríamos competir frente a distribuciones actuales de camiones cisterna.

Por otro lado, existen subvenciones regionales como la Agencia Andaluza de la Energía, que proporciona ayudas para instalaciones de energía solar térmica y fotovoltaica, con ayudas de hasta el 50 %, por tanto, nos reduciría el coste del subtotal de la instalación a 60.777,50 €, lo que nos dejaría un coste total al final de los 15 años de 93.277,5 €. Dejándonos un coste por litro de agua de 0,1135 €/L.

6.1.7 ESCENARIO Y ESCALABILIDAD

La escalabilidad de la solución se mantiene y la elección de componentes se mantiene, pero en mayores cantidades, lo que facilita el proceso. Los cálculos previos, se han realizado con un proyecto piloto estándar de 100 m², por lo tanto, para un escalado a 1.000 m², es decir,

una instalación 10 veces mayor, lo que supondría un gasto de 1.540,550 €, incluso un ligero porcentaje menos, ya que la gran diferencia sería en la adquisición de materiales, sin embargo, los costes de mantenimiento y limpieza disminuirían al mantenerse los contratos. Un modelo optimizado y a mayor escala sería ideal para grandes explotaciones agrícolas, o desarrollos comunitarios autosuficientes, o incluso, pequeños complejos turísticos que estén interesados en la búsqueda de autonomía hídrica y quieran dar imagen de apoyo a la sostenibilidad avanzada.

6.1.8 CONCLUSIÓN ECONÓMICA

La meticulosa selección de los mejores componentes disponibles en el mercado define el análisis del sistema híbrido de recuperación de humedad ambiental. Pese a que la inversión inicial sea elevada, este precio prima por la calidad y eficiencia, que a la larga nos asegura la fiabilidad de los materiales, la reducción de costes de mantenimiento correctivo, el rendimiento optimizado de la maquinaria y el aumento de la vida útil del sistema. En caso de adquirir la subvención de la unión europea, no solo tendríamos una independencia hídrica estratégica y una resiliencia climática invaluable, sino que el precio por unidad sería más que competitivo y nos generaría ahorros a largo plazo.

Por tanto, desde el punto de vista económico, el sistema no es simplemente una opción viable, sino que es una inversión estratégica con un alto retorno en un plazo de quince años, tirando a la baja la vida útil de la maquinaria. En caso de estar ser mayor con los años, el coste por unidad se vería reducido en mayor escala.

6.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y RIESGOS

La correcta viabilidad de un proyecto ha de ser estudiada no solo teniendo en cuenta las condiciones idílicas en las que se llevaría a cabo el proyecto, sino que también habría que tener en cuenta las posibles incongruencias entre el planteamiento y la puesta en marcha de este, más aún en instalaciones de entornos complejos. Este apartado pretende analizar las posibles fluctuaciones que se puedan llegar a dar en sus parámetros clave, para poder

establecer mitigaciones de riesgo asociados a su puesta en marcha y funcionamiento a largo plazo.

6.2.1 ANÁLISIS DE RIESGOS

La conciencia de los posibles riesgos que puedan surgir es esencial en la planificación de un proyecto, de tal manera que una vez identificados estos y teniendo en cuenta la probabilidad con la que puedan ocurrir y las consecuencias que supondrían para el correcto funcionamiento de la instalación, se puedan plantear estrategias para mitigarlos.

En primer lugar, tenemos los riesgos técnicos, pese a que en la vida útil se tengan en cuenta la degradación de los materiales y la programación obsoleta de la maquinaria, puede haber fallos prematuros en los componentes electromecánicos, o una degradación más rápida de los desecantes, o incluso una fractura o corrosión de la estructura de la instalación. Cualquiera de estos imprevistos supondría un aumento en los gastos operativos, así como una reducción de la vida útil del sistema y, por tanto, un aumento de lo que sería el costo a largo plazo del agua producida. Para hacer frente a estos imprevistos, tendríamos que hacer una estructura robusta y modular para que sea más simple la reposición de las partes fallidas, además de confiar desde un primer momento en marcas líderes en el sector de cada componente para evitar fallos imprevistos o prematuros. Añadido a ello, mantener un seguimiento preventivo mensual y llevar a cabo una instalación de monitoreo para detectar anomalías en los componentes electromecánicos antes de tiempo.

Por otro lado, están los riesgos económicos, en los que entran las posibles fluctuaciones en los precios de los materiales, con lo que afectaría directamente a nuestra inversión inicial, o que las condiciones de las subvenciones variasen y, con ello, las ayudas que recibiríamos, lo cual haría que nuestro proyecto fuera menos rentable, el hecho de que sea un proyecto sostenible y alineado con las mejoras propuestas para 2030 nos hace uno de las principales potencias a recibir estas ayudas económicas. Añadido a ello, la correcta elección de los fabricantes de los que nos fiaremos en un principio haría que la vida útil del sistema

aumentase y fuese más rentable. Cabe añadir, que ser una fuente hídrica independiente nos blindaría antes los cambios de los precios en el mercado hídrico de cara al futuro.

En cuanto a los riesgos operativos se refiere, ya sean la falta de personal cualificado, la fuga de personal con el paso de los años, o la incorrecta instalación de algún mecanismo de la estructura planteada, haría que el funcionamiento no fuera óptimo, lo que supondría un aumento de costes, llegando incluso a provocar la interrupción del suministro de agua. Para ello es esencial, blindar a los trabajadores con buenas condiciones laborales, llevar a cabo programas de capacitación del personal y el uso de tanques, como el que está planteado, sirve como respaldo en situaciones de desabastecimiento del agua.

Añadido a ello, hay una serie de riesgos ambientales a los que se enfrentaría un proyecto de recuperación de agua a partir de la humedad ambiental, como podrían ser por cambios climáticos extremos prolongados que afectasen a la presencia habitual de humedad en la región, es por ello, que hemos optado por un programa híbrido que es capaz de producir agua sin que afecten tanto las condiciones externas en las que se encuentren.

Sumado a estos riesgos, están los riesgos regulatorios y de normativa, que implican cambios en los requisitos o cumplimientos de las normativas de calidad del agua, de restricciones a espacios protegidos como es el caso del Desierto de Tabernas, o tardanzas inesperadas en los trámites burocráticos, todo ello supondría un retraso en el proceso de puesta en marcha del proyecto, así como probablemente un aumento de costes por incumplimientos de plazos, e incluso, en casos extremos, llegar a la inviabilidad del proyecto. Para mitigar estos sucesos, es esencial realizar un estudio legal exhaustivo desde un comienzo y mantener proactividad en este ámbito a lo largo de todo el proceso y, desde un inicio, plantear un proyecto que cumpla con las reglas internacionales que suelen ser las más estrictas.

6.2.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Este proyecto se ha llevado a cabo un método de “un factor a la vez”, es decir, se varía un parámetro, manteniendo el resto constantes. Todos estos parámetros habiéndolos obtenidos de fuentes fiables y reales con sensores insitu en el propio Desierto de Tabernas, estás

modificaciones nos iban haciendo ver las consecuencias de estas pequeñas variaciones individuales. A partir de este análisis hemos podido observar cuales han sido los parámetros más influyentes en la puesta en marcha de este proyecto y del impacto que tenían en su funcionamiento.

En primer lugar, la humedad relativa es el primer parámetro clave y fundamental en el correcto funcionamiento del proyecto propuesto, en donde observamos un rango de variación de esta entre el 40 % y el 75 %, dependiendo de la estacionalidad del año, respecto a una media próxima al 60 %. Los valores de este parámetro son esenciales para la correcta absorción del agua por parte de los desecantes ya que estos dependen de la presión parcial de vapor presente en la atmósfera, que recae directamente en la humedad relativa. Una disminución drástica de la media del Desierto de Tabernas supondría tener que instalar ciclos de regeneración más frecuentes lo que conllevaría un mayor gasto, sin embargo, este gasto estaría respaldado por la autonomía de energía que tenemos con los paneles solares que se instalarían con la puesta en marcha de la propuesta.

Ya que dependemos de una fuente autónoma de energía renovable solar, el siguiente parámetro sobre el cual dependemos para el funcionamiento óptimo del sistema, es la radiación solar, lo que nos supondría una pequeña variación de esta según la estación del año en la que nos encontremos, lo que tendría un impacto directo en la cantidad de energía producida para la regeneración térmica de los desecantes, lo que supondría un aumento en el tiempo requerido para la regeneración de los desecantes, llegándose incluso a necesitar una fuente de energía externa.

Haber tenido en cuenta una vida útil tanto demasiado pesimista (10 años), como demasiado optimista (20 años), en lugar de los 15 años base que hemos calculado, tendría un impacto directo el cálculo total del coste del agua producida a largo plazo, haciendo ver que el proyecto fuera demasiado rentable, o por el contrario, un desastre.

6.2.3 CONCLUSIONES

Para concluir este apartado, en cuanto al análisis de los riesgos se refiere pese a que, como cualquier proyecto, no este exento de enfrentarse a ellos, el sistema propuesto conlleva propuestas de mitigación implícitas en él, su naturaleza autónoma, sostenible y basadas en fuentes hídricas inagotables, lleva intrínseca una solución frente a cambios climáticos inesperados, así como de suministro o económicos. Todo ello capacita al proyecto para un cumplimiento a largo plazo, de manera sostenible, fiable y viable.

El sistema es más sensible a variaciones de humedad relativa y radiación solar, lo que hemos previsto con un sistema robusto frente a fluctuaciones en los parámetros esenciales de funcionamiento.

Capítulo 7. IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL

Este apartado tiene como fin analizar el impacto ambiental que tiene la puesta en marcha del proyecto en la región del Desierto de Tabernas. Este capítulo es de crucial importancia para poder identificar posibles puntos débiles del proyecto por si fuera necesario buscar alternativas que redujesen el impacto negativo de esta misma previa a su instalación.

La implementación de sistemas innovadores para la obtención de recursos híbridos, siendo estos vitales para tanto el ser humano, como para el medio ambiente, no se evalúan únicamente por su viabilidad técnica y económica, pero por su impacto positivo en su entorno social y ambiental. Es por ello, que analizaremos los beneficios claves que surgen de la aplicación de la aplicación del proyecto mixto planteado previamente en regiones de estrés hídrico, como en nuestro caso es el Desierto de Tabernas.

En primer lugar, analizaremos los beneficios sociales. La disponibilidad de agua potable es un derecho humano fundamental y, a su misma vez, un motor para el correcto desarrollo social. La implementación de un sistema de recuperación de humedad atmosférica, como la propuesta en este trabajo, atrae consigo múltiples beneficios directos e indirectos a nivel social. En caso de que nuestra propuesta se desarrollará en lugares con menos seguridad higiénica que en España, este proyecto supondría una mejoría en la salud pública y en la higiene de la sociedad, el acceso de agua proveniente de fuentes no potables está directamente correlacionadas con las enfermedades transmitidas por el agua, como bien pueden ser la cólera o la diarrea, lo que conllevaría una disminución de la mortalidad infantil y un aumento del bienestar de la sociedad. Añadido a ello, el acceso a agua potable en regiones áridas y remotas es muchas veces escasa, limitada y costosa. Por tanto, un sistema de producción local de agua garantizaría la fiabilidad del suministro local sin interrupciones, mitigando así la escasez y reduciendo la vulnerabilidad de las comunidades. La implantación de este requeriría de personal para llevar a cabo de instalación técnica del sistema y, además, personal que se encargase de limpiar y llevar a cabo el mantenimiento preventivo para

conservar el buen estado de la maquinaria, por tanto, crearía oportunidades de empleo para comunidades locales y transferiría conocimientos técnicos en gestión hídrica y energía, fomentando con el paso de los años, una fuerza laboral especializada y cualificada en el sector. Todo esto, reduciría la dependencia de las comunidades de ayudas externas, lo cual les empoderaría y, con el paso de los años, les podría liderar a llevar a cabo otros avances tecnológicos en la localidad. Finalmente, la disponibilidad estable de agua ayudaría a la comunidad a desarrollar otras actividades económicas, ya bien sea, pequeñas explotaciones agrícolas, o negocios artesanales locales, es decir, sería posible que la comunidad tuviera diversificación económica.

Seguidamente, estudiaremos los beneficios ambientales, los cuales se alinean con los principios de sostenibilidad ambiental y con el proyecto 2030 actualmente vigente en nuestra normativa, el cual nos ofrecería soluciones frente a desafíos críticos como son la escasez de agua y el cambio climático. Primeramente, reduciríamos la huella hídrica y disminuiríamos la dependencia a fuentes hídricas finitas, esto se basa en que el sistema se sustenta en una fuente continuamente inagotable como es la humedad atmosférica, esto reduce la necesidad de tener que extraer agua de acuíferos subterráneos sobreexplotados u otras fuentes finitas y cuya capacidad disminuirá con el aumento del cambio climático y, por tanto, de la demanda hídrica. El hecho de disminuir la presión ejercida en estas fuentes convencionales contribuiría a la regeneración de ecosistemas acuáticos y la protección de la biodiversidad, todo esto debido a que es un proyecto basado en el agua producida en lugar del agua extraída, esto es fundamental para preservar a las pocas especies adaptadas a las condiciones extremas presentes en los climas áridos. Por otro lado, habría una disminución significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero, esto se vería reflejado debido a la disminución de combustible fósil de los transportes, además, al estar alimentada por energía renovable, reduce las emisiones que causarían los sistemas tradicionales alimentados por combustibles.

Por otra parte, la adaptación social de la región a la implantación no creo que fuera un problema, ya que en España la sociedad está concienciada sobre el cambio climático y la sostenibilidad de las obras civiles que se vayan realizando de ahora en adelante. Sin embargo,

en caso de que fuera necesario, se podrían realizar programas de sensibilización y participación comunitaria para que pudieran experimentar con talleres la pureza del agua que se extrae, que vieran reflejados los beneficios a largo plazo, para que aceptaren la instalación del sistema, sin embargo, reitero que no creo que hiciera falta.

En cuanto a la aceptación estética de la implantación de un sistema marcado por paneles solares y maquinaria, podría ser un punto de choque con la población cercana, es por ello, que habría que considerar realizar un diseño que prime colores que no desentonen con el entorno del Desierto de Tabernas, o si hiciera falta para la aceptación, se podrían semi-enterrar los tanques de almacenamiento para minimizar el impacto visual del sistema.

La correcta integración exitosa del sistema de recuperación de humedad ambiental basado en un sistema híbrido requiere no solo abordar los aspectos técnicos y económicos, sino la interacción completa con las comunidades que rodeen a la región y el medio ambiente. La correcta gestión de este, garantizarían un futuro más sostenible y seguro hídricamente para las regiones áridas.

Capítulo 8. NORMATIVA LEGAL

La implementación de un sistema innovador, como es el caso del proyecto propuesto, que integra tecnologías de producción hídrica y de energía solar, requiere un estricto cumplimiento de un marco jurídico tanto a nivel europeo, como nacional y regional, cada cual con sus cumplimientos específicos. El cumplimiento de esta normativa garantiza la calidad del agua producida, a la par que la protección del medio ambiente, la seguridad de las instalaciones y la correcta implementación del proyecto.

La normativa que se ha tendido en cuenta se muestra a continuación, estructura en orden creciente, su cumplimiento es tan crucial como el cumplimiento técnico de la instalación:

8.1 NORMATIVA REGIONAL (ANDALUCÍA)

- Gestión del Agua en Andalucía
 - Ley 9/2010 número 151 del Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, del 30 de julio, de Aguas de Andalucía, cuyo objetivo es establecer la normativa de la gestión del agua en Andalucía, tanto en instalaciones como en usos específicos.
 - Plan hidrológico de la demarcación hidrográfica de las cuencas mediterráneas andaluzas, que establece los parámetros de calidad y protección de los recursos hídricos en el ámbito regional.
- Normativa urbanística y de ordenación del territorio
 - Ley 7/2021, del 1 de diciembre, acerca del impulso para la sostenibilidad del territorio de Andalucía, se aprueban las clasificaciones y usos de los suelos.
- Autorizaciones y licencias municipales
 - Ley 7/1985, del 2 de abril, en el que se establecen las licencias necesarias para la puesta en marcha de los proyectos planteados.
- Fomento de energías renovables y autoconsumo

- Boja número 56, del 23 de marzo de 2021, establece el marco por el que se rigen las subvenciones gestionadas por la agencia andaluza de la energía.
- Protección ambiental y espacios naturales
 - Decreto 248/1989, del 26 de diciembre, en que se establece el Desierto de Tabernas como paraje natural y por tanto, ha de cumplir una protección específica.
 - Ley 2/1989, del 18 de julio, del Inventario de espacios naturales protegidos de Andalucía, por el cual se establecen medidas adicionales para su protección, en el que se protegen reservas naturales como es el caso del Desierto de Tabernas.
 - Planes de ordenación de los recursos naturales (PORN) y Planes rectores de uso y gestión (PRUG), los cuales son normativas muy estrictas que establecen las actividades permitidas y redactan las limitaciones de construcción en el Paraje natural de Desierto de Tabernas.

(Boletín Oficial de la Junta de Andalucía, S,A),

8.2 *NORMATIVA NACIONAL, LEYES Y DECRETOS*

- Calidad del agua para el consumo humano
 - Real Decreto 3/2023 (BOE), del 10 de enero, en el que se transpone la Directiva de agua potable 2020/2184, en el que se establecen los parámetros para garantizar la calidad del agua, pautando los controles y obligaciones que han de realizar las empresas de gestión hídrica.
- Autoconsumo de energía eléctrica
 - Real Decreto 244/2019 (BOE), del 5 de abril, redacta los trámites necesarios para la instalación de un autoconsumo fotovoltaico.
- Gestión de residuos

- Ley 7/2022 (BOE), del 8 de abril, en la que se desarrolla los principios de los residuos que pueda haber, en nuestro caso, los materiales adquiridos tras su vida útil.
- Seguridad y construcción
 - Real Decreto 314/2006 (BOE), del 17 de marzo, en la que se establece la normativa de las estructuras y la seguridad en caso de ocurrir un incendio en las instalaciones.
 - Real Decreto 842/2002 (BOE), del 18 de septiembre, este real decreto regula las instalaciones eléctricas de baja tensiones, así como sus conexionados.
- Evaluación ambiental
 - Ley 21/2013 (BOE), del 9 de diciembre, en la que se transpone la evaluación de impacto ambiental.
- Gestión del agua
 - Real Decreto Legislativo 1/2001 (BOE), del 20 de julio, trata sobre la gestión de recursos hídricos en España, pese a que nuestro proyecto se centre en la recuperación de agua mediante la humedad atmosférica, al tratarse de una zona protegida donde lo aplicaremos, hemos de cumplirlo.

(Boletín Oficial del Estado, S,A),

8.3 NORMATIVA EUROPEA, DIRECTIVAS FUNDAMENTALES

- Fomento de energías renovables
 - Directiva UE 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE), del 11 de diciembre de 2018, en la que se establecen mecanismos de fomentación acerca de las energías renovables y promueven incentivos para su desarrollo, lo cual nos afecta por la presencia de paneles y tubos de vacío fotovoltaicos.
- Evaluación de impacto ambiental (EIA)

- Directiva UE 2011/92/UE del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE), del 13 de diciembre de 2011, posteriormente modificada por la Directiva 2014/52/UE, en la que se establecen los procedimientos de evaluación de riesgos ambientales a los que un proyecto deberían someterse dependiendo de su magnitud y escalabilidad.
- Gestión de residuos
 - Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE), del 19 de noviembre de 2008, establece la jerarquía de los residuos y la gestión de ellos, todos los materiales del sistema, tras la finalización de su vida útil han de seguir estas normativas.
- Marcado CE
 - Directiva de Baja Tensión 2014/35/UE, Directiva de Compatibilidad Electromagnética 2014/30/UE, esta normativa ha de cumplirse en los materiales que formen parte de nuestro sistema, de serie ya se cumplirían, pero habría que asegurarse de ello.
- Calidad del agua para consumo humano
 - Directiva UE 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo (DOUE), del 16 de diciembre de 2020, establece los parámetros biológicos y químicos permitidos en aguas destinadas al consumo humano.

(Diario Oficial de la Unión Europea, S,A)

Capítulo 9. CONCLUSIONES

Tras el análisis económico, técnico y comparativo hecho a lo largo de este trabajo acerca de posibles soluciones para hacer frente a la escasez hídrica mediante la recolección de agua a través de la humedad ambiental, focalizando el estudio en el Desierto de Tabernas, en Almería, España, el proyecto ha alcanzado lograr sus objetivos iniciales, aprobando la viabilidad económica de la producción autónoma y sostenible de agua potable a partir de una fuente no convencional.

El estudio ha confirmado que este método de obtención de agua no solo es una posibilidad teórica, sino una solución tecnológicamente viable y altamente prometedora. Tras analizar y contrastar técnicas tanto activas como pasivas, se ha determinado que el modelo híbrido desecante-condensador, es la opción más adecuada y eficiente para las condiciones concretas del Desierto de Tabernas. Entre los hallazgos más relevantes de este método destaca la eficiencia bajo condiciones áridas, donde mediante la integración de ciclos de absorción con desecantes sólidos (zeolitas), las cuales tienen una notable capacidad de absorción y desorción, permite al sistema operar eficientemente incluso con condiciones meteorológicas no optimas, como podrían ser bajas humedades relativas, ventaja fundamental en comparación con las técnicas pasivas que demandan condiciones muy exigentes.

Así mismo, la sinergia energética combinando colectores solares de tubos de vacío para la regeneración térmica del desecante, con la energía solar fotovoltaica para la alimentación del condensador activo, maximiza la eficiencia energética y hace al sistema prácticamente independiente a la red eléctrica. Por otro lado, el diseño modelo de 100 m², es capaz de producir 150 litros de agua, cantidad suficiente para abastecer pequeños asentamientos, Añadido a ello, el agua recolectada pasa por un proceso de filtración UV que asegura la potabilidad del agua. Por último, el meticuloso proceso de la correcta obtención de componentes de buena calidad hace un sistema robusto, lo que conlleva a mayor fiabilidad y menores gastos operativos a largo plazo.

CONCLUSIONES

La rentabilidad financiera ha sido calculada mediante un análisis detallado, para los cuales se ha considerado una vida útil del sistema de 15 años, periodo sobre el cual se reflejan flujos de costes e ingresos. En cuanto al CAPEX, se estima una cantidad de 121.555 €, estructurada en la adquisición de los componentes iniciales, para la puesta en marcha del sistema. Para los OPEX, se han proyectado 32.500 € durante la vida útil del proyecto. A partir de estas estimaciones detalladas a lo largo del trabajo, obtenemos un LCOW de 0,18758 €/litro, cifra que hace el sistema competente frente a técnicas de obtención de agua tradicionales y qué, además, nos da la autonomía necesaria para hacer frente a condiciones extremas que puedan llegar a darse por el cambio climático.

Para seguir avanzando en el desarrollo de esta tecnología, se recomienda investigar acerca de nuevos materiales los cuales puedan llegar a tener mayor capacidad de absorción y, por tanto, nuevos sistemas de almacenamientos que tuvieran mayor capacidad de almacenaje para hacer frente a mayores volúmenes de agua obtenida.

Capítulo 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Bendezu, K., “DIAGRAMA UML Y ARQUITECTURA DEL SISTEMA“, Sistemas Distribuidos 2013, Febrero, 2013, <http://comparape.blogspot.com.es/2013/02/diagrama-uml-y-arquitectura-del-sistema.html>,
- [2] Herrero Alcántara, T, “Big Data: ¿Moda u oportunidad de negocio para el emprendedor?“, Think Big, Octubre 2014, <http://blogthinkbig.com/big-data-emprendedor/>,
- [3] Loeffler, B, “Cloud Computing: What is Infrastructure as a Service“, Microsoft Technet Magazine, October 211, <https://technet.microsoft.com/en-us/magazine/hh509051.aspx>
- [4] Vlassis, N,A.; Papakonstantinou, G.; Tsanakas, P, *Dynamic sensory probabilistic maps for mobile robot localization*, Source: Proceedings, 1998 IEEE / RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat, No,98CH36190) New York, NY, USA: IEEE, 1998,p,718-23 vol,2 of 3 vol, xlv+2010 pp, 11,
- [5] WHO/UNICEF, (2022), *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2022*, <https://www.who.int/publications/i/item/9789240060807>
- [6] Melo, M, F, (2023, 1 noviembre), ¿Qué países corren más riesgo de padecer sequía? *Statista Daily Data*, <https://es.statista.com/grafico/25092/paises-segun-su-indice-de-riesgo-de-sequia/>
- [7] World Resources Institute, (2023), *Aqueduct Water Risk Atlas*, <https://www.wri.org/aqueduct>
- [8] Meyer, D., Molle, P., Esser, D., Troesch, S., Masi, F, & Dittmer, U, (2012), Constructed Wetlands for Combined Sewer Overflow Treatment—Comparison of German, French and Italian Approaches, *Water*, 5(1), 1-12, <https://doi.org/10.3390/w5010001>
- [9] Kim, H., Yang, S., Rao, S, R., Narayanan, S., Kapustin, E, A., Furukawa, H., Umans, A, S., Yaghi, O, M., & Wang, E, N, (2017), Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight, *Science*, 356(6336), 430-434, <https://doi.org/10.1126/science.aam8743>
- [10] Atrapanieblas: una solución para captar agua en tiempos de sequía, (s, f), <https://www.sostenibilidad.com/agua/atrapanieblas>

- [11] Shi, Y., Ilic, O., Atwater, H, A., & Greer, J, R, (2021), All-day fresh water harvesting by microstructured hydrogel membranes, *Nature Communications*, 12(1), <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23174-0>
- [12] Elia, M., & Al-Abidi, A, A, (2023), Optimising desiccants for multicyclic atmospheric water generation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56, 103132, <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103132>
- [13] Villarroel, G, (2009, 24 abril), *Atrapanieblas: de Chile para el mundo*, BBC News Mundo, https://www.bbc.com/mundo/participe/2009/04/090422_1224_participe_atrapanieblas_am?utm_source.com
- [14] Connor, N, (2020, 9 enero), *¿Qué es la teoría de las turbinas de vapor? Termodinámica: definición*, Thermal Engineering, https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-teoria-de-las-turbinas-de-vapor-termodinamica-definicion/?utm_source.com
- [15] Fundación Aquae, (2021, 24 agosto), *Cómo evitar las sequías con un atrapanieblas - Fundación Aquae*, <https://www.fundacionaquae.org/wiki/atrapanieblas/>
- [16] Grape, E, S., Chacón-García, A, J., Rojas, S., Pérez, Y., Jaworski, A., Nero, M., Åhlén, M., Martínez-Ahumada, E., Feindt, A, E, G., Pepillo, M., Narongin-Fujikawa, M., Ibarra, I, A., Cheung, O., Baresel, C., Willhammar, T., Horcajada, P., & Inge, A, K, (2023), Removal of pharmaceutical pollutants from effluent by a plant-based metal–organic framework, *Nature Water*, 1(5), 433-442, <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00070-z>
- [17] iAgua, R, (2021, 25 junio), Un nuevo sistema permite recolectar agua potable de la humedad de la atmósfera durante todo el día, *iAgua*, <https://www.iagua.es/noticias/europa-press/nuevo-sistema-permite-recolectar-agua-potable-humedad-atmosfera-durante-todo>
- [18] *Técnicas y tecnologías de captación de agua en la atmósfera*, (s, f), https://es.accirwater.com/atmospheric-water-harvesting-techniques-and-technologies_n4
- [19] *Tecnología de rotor industrial | Munters*, (s, f), https://www.munters.com/es-es/aplicaciones/deshumidificacion/tecnologia-del-rotor/?utm_source.com
- [20] EcoInventos, (2021, 15 diciembre), *Un dispositivo que extrae agua del aire, incluso en climas desérticos, solo con ayuda del sol*, <https://ecoinventos.com/dispositivo-que-extrae-agua-del-aire/>
- [21] David, (2024, 11 agosto), Ingenieros del KAUST inventan un dispositivo solar que extrae 3 litros de agua al día del aire del desierto, *EcoInventos*,

- <https://ecoinventos.com/ingenieros-del-kaust-inventan-un-dispositivo-solar-que-extrae-3-litros-de-agua-al-dia-del-aire-del-desierto/>
- [22] Aquaer Generators, (s, f.), *Aquaer Generators*, <https://aquaer.com/>
- [23] Compresores para aplicaciones de refrigeración, aire acondicionado y calefacción | Danfoss, (s, f.), <https://www.danfoss.com/es-es/products/dcs/compressors/#tab-other>
- [24] YDRY GROUP S,L, (s, f.), *Desecantes formato Industria - Desecantes | Sales desecantes | Gel de Silice*, YDRY Desecantes | Sales Desecantes, <https://ydrygroup.com/categoria-producto/desecantes-formato-industria>
- [25] *Vitosol 200-TM: Colector de tubos de vacío* | Viessmann ES, (2024, 31 octubre), <https://www.viessmann.es/es/productos/sistemas-de-energia-solar/vitosol-200-tm.html>
- [26] *HIKU6 – Canadian Solar – Global*, (s, f.), <https://www.canadiansolar.com/hiku6/>
- [27] Davidklotz, (2025, 21 abril), *Molecular Sieves*, ZEOCHEM, <https://zeochem.com/our-products/molecular-sieves/#4a>
- [28] Snyder Industries: Poly Tanks | IBC Totes | Bins | Containers | Pallets, (s, f.), <https://www.snydernet.com/>
- [29] Desinfección ultravioleta - TrojanUV - ES, (s, f.), <https://www.trojanuv.com/es/>
- [30] Galería de imágenes de Agua De Araoz en Almería, (s, f.), <https://www.aguadearaoz.com/galeria>
- [31] *LIFE - Climate action sub-programme*, (s, f.), European Climate, Infrastructure And Environment Executive Agency, https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life/life-climate-action-sub-programme_en?utm_source=com
- [32] Romero, J, (2024, 2 octubre), Cadena SER, *Cadena SER*, <https://cadenaser.com/andalucia/2024/10/02/la-autoridad-portuaria-de-almeria-ejecutara-en-dos-anos-225-millones-de-fondos-captados-entre-2023-y-2024-ser-almeria.com>
- [33] Boletín oficial de la Junta de Andalucía - Sede electrónica del BOJA - Junta de Andalucía - Junta de Andalucía, (s, f.), <https://www.juntadeandalucia.es/eboja.html>
- [34] *Ayuntamiento de Tabernas | Sede electrónica, oficina virtual*, (s, f.), <https://www.tabernas.es/Servicios/cmsdipro/index.nsf/informacion.xsp?p=Tabernas&documentId=31434BDF7BCC6F40C12580F1005F1352>
- [35] BOE,es - Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado, (s, f.), <https://boe.es/>

- [36] *Diario Oficial de la Unión Europea - EUR-Lex*, (s, f.), <https://eur-lex.europa.eu/oj/direct-access.html?locale=es>

ANEXO I: PROGRAMACIÓN

A continuación, se detallará la programación en Anaconda para el análisis de datos del último año de las condiciones meteorológicas recogidas por el SIAR,

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from datetime import datetime
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
# Configuración de visualización
plt.style.use('ggplot')
plt.rcParams['figure.figsize'] = (12, 6)
sns.set_palette("husl")
# Cargar los datos (asegúrate de tener el archivo en el mismo
    directorio)
    try:
df = pd.read_csv('Tabernas.csv', sep=';', parse_dates=['FECHA'],
dayfirst=True)
print(" Datos cargados correctamente")
print(f" Rango temporal: {df['FECHA'].min(),date()} a
{df['FECHA'].max(),date()}")
print(f" Número de registros: {len(df)}")
# Filtrar solo los datos de 2024
df_2024 = df[df['FECHA'].dt.year == 2024]
print(f" Número de registros de 2024: {len(df_2024)}")
print(f" Rango temporal 2024: {df_2024['FECHA'].min(),date() if not
df_2024.empty else 'N/A'} a {df_2024['FECHA'].max(),date() if not
df_2024.empty else 'N/A'}")
```

except Exception as e:

```
print(f" Error al cargar los datos: {e}")
```

Limpieza de datos

```
df.replace('n/d', pd.NA, inplace=True)
```

```
df = df.dropna(subset=['FECHA']) # Eliminar filas sin fecha
```

Filtrar solo datos de 2024

```
# Asumiendo que 'FECHA' es una columna datetime o string con formato  
de fecha
```

```
if pd.api.types.is_datetime64_any_dtype(df['FECHA']):
```

```
# Si FECHA ya es datetime
```

```
df = df[df['FECHA'].dt.year == 2024]
```

```
else:
```

```
# Si FECHA es string, primero convertir a datetime
```

```
df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'], errors='coerce')
```

```
df = df[df['FECHA'].dt.year == 2024]
```

Convertir columnas numéricas

```
numeric_cols = ['Al04TMin', 'Al04TMed', 'Al04HumMax', 'Al04HumMin',  
'Al04HumMed', 'Al04VelVientoMax', 'Al04Rad', 'Al04Precip']
```

```
df[numeric_cols] = df[numeric_cols].apply(pd.to_numeric,  
errors='coerce')
```

Crear columnas de año y mes

```
df['Año'] = df['FECHA'].dt.year
```

```
df['Mes'] = df['FECHA'].dt.month
```

```
df['Día'] = df['FECHA'].dt.day
```

1, Análisis de temperaturas

```
def analizar_temperaturas():
```

```
print("\n === ANÁLISIS DE TEMPERATURAS ===")
```

Temperaturas medias anuales

```
temp_anual = df.groupby('Año')['Al04TMed'].mean()
```

```
print("\n Temperatura media anual:")
```

```
display(temp_anual)
```

Temperaturas extremas

```
max_temp = df['Al04TMed'],max()
min_temp = df['Al04TMin'],min()
print(f"\n Temperatura máxima media: {max_temp:,1f}°C")
print(f" Temperatura mínima absoluta: {min_temp:,1f}°C")
# Variación mensual
temp_mensual = df.groupby('Mes')[['Al04TMin', 'Al04TMed']],mean()
print("\n Temperaturas medias mensuales:")
display(temp_mensual)
# Gráficos
plt.figure(figsize=(14, 7))
plt.plot(df['FECHA'], df['Al04TMed'], label='Temperatura Media',
color='orange', linewidth=1)
plt.plot(df['FECHA'], df['Al04TMin'], label='Temperatura Mínima',
color='blue', alpha=0,7, linewidth=1)
plt.title('Evolución de Temperaturas en Tabernas', fontsize=14, pad=20)
plt.xlabel('Fecha', fontsize=12)
plt.ylabel('Temperatura (°C)', fontsize=12)
plt.legend(fontsize=12)
plt.grid(True, alpha=0,3)
plt.tight_layout()
plt.show()
# 2, Análisis de humedad
def analizar_humedad():
    print("\n === ANÁLISIS DE HUMEDAD ===")
# Humedad media anual
humedad_anual = df.groupby('Año')['Al04HumMed'],mean()
print("\n Humedad relativa media anual:")
display(humedad_anual)
# Variación mensual
humedad_mensual = df.groupby('Mes')[['Al04HumMin', 'Al04HumMed',
'Al04HumMax']],mean()
print("\n Humedad relativa mensual:")
```

```
display(humedad_mensual)

# Gráficos
plt,figure(figsize=(14, 7))
plt,plot(df['FECHA'], df['Al04HumMed'], label='Humedad Media',
         color='green', linewidth=1)
plt,title('Evolución de la Humedad Relativa en Tabernas', fontsize=14,
         pad=20)
plt,xlabel('Fecha', fontsize=12)
plt,ylabel('Humedad Relativa (%)', fontsize=12)
plt,grid(True, alpha=0,3)
plt,tight_layout()
plt,show()

# 3, Análisis de precipitaciones
def analizar_precipitaciones():
    print("\n === ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES ===")

    # Precipitación anual
    precipitacion_anual = df.groupby('Año')['Al04Precip'].sum()
    print("\n Precipitación anual (mm):")
    display(precipitacion_anual)

    # Días de lluvia por año
    dias_lluvia = df[df['Al04Precip'] > 0].groupby('Año').size()
    print("\n Días de lluvia por año:")
    display(dias_lluvia)

    # Meses más lluviosos
    precipitacion_mensual =
        df.groupby('Mes')['Al04Precip'].sum(),sort_values(ascending=False)
    print("\n Precipitación por mes (orden descendente):")
    display(precipitacion_mensual)

    # Gráficos
    plt,figure(figsize=(14, 7))
    df['Al04Precip'].rolling(30).sum().plot(color='blue', linewidth=1)
```

```
plt,title('Precipitación acumulada (30 días) en Tabernas',
        fontsize=14,pad=20)
plt,xlabel('Fecha', fontsize=12)
plt,ylabel('Precipitación (mm)', fontsize=12)
plt,grid(True, alpha=0,3)
plt,tight_layout()
plt,show()
# 4, Análisis de viento y radiación
def analizar_viento_radiacion():
    print("\n=== ANÁLISIS DE VIENTO Y RADIACIÓN ===")
    # Viento medio anual
    viento_anual = df.groupby('Año')['Al04VelVientoMax'],mean()
    print("\n Velocidad máxima de viento media anual (km/h):")
    display(viento_anual)
    # Radiación solar media anual
    radiacion_anual = df.groupby('Año')['Al04Rad'],mean()
    print("\n Radiación solar media anual (MJ/m²):")
    display(radiacion_anual)
    # Gráficos
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(14, 10))
    ax1,plot(df['FECHA'], df['Al04VelVientoMax'], color='purple',
            linewidth=1)
    ax1,set_title('Velocidad máxima del viento en Tabernas', fontsize=14,
            pad=15)
    ax1,set_ylabel('Velocidad (km/h)', fontsize=12)
    ax1,grid(True, alpha=0,3)
    ax2,plot(df['FECHA'], df['Al04Rad'], color='red', linewidth=1)
    ax2,set_title('Radiación solar en Tabernas', fontsize=14, pad=15)
    ax2,set_ylabel('Radiación (MJ/m²)', fontsize=12)
    ax2,grid(True, alpha=0,3)
    plt,tight_layout()
    plt,show()
```

```
# 5, Correlaciones entre variables
def analizar_correlaciones():
    print("\n === CORRELACIONES ENTRE VARIABLES ===")
# Matriz de correlación
corr_matrix = df[['Al04TMed', 'Al04HumMed', 'Al04VelVientoMax',
'Al04Rad', 'Al04Precip']],corr()
print("\n Matriz de correlación:")
display(corr_matrix)

# Gráfico de correlación
plt,figure(figsize=(10, 8))
sns,heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', center=0,
fmt=",.2f",
annot_kws={"size": 12}, cbar_kws={"shrink": 0,8})
plt,title('Correlación entre Variables Meteorológicas', fontsize=14,
pad=20)
plt,xticks(fontsize=12)
plt,yticks(fontsize=12)
plt,tight_layout()
plt,show()
```

ANEXO I: PROGRAMACIÓN

A continuación, se detallará la programación en Anaconda para el análisis de datos de los datos de los últimos 25 años de las condiciones meteorológicas recogidas por el SIAR,

```
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
from datetime import datetime
import warnings
warnings.filterwarnings('ignore')
# Configuración de visualización
plt.style.use('ggplot')
plt.rcParams['figure.figsize'] = (12, 6)
sns.set_palette("husl")
# Cargar los datos (asegúrate de tener el archivo en el mismo
    directorio)
try:
    df = pd.read_csv('Tabernas.csv', sep=';', parse_dates=['FECHA'],
        dayfirst=True)
    print("Datos cargados correctamente")
    print(f"Rango temporal: {df['FECHA'].min(), date()} a
        {df['FECHA'].max(), date()}")
    print(f"Número de registros: {len(df)}")
except Exception as e:
    print(f"Error al cargar los datos: {e}")
# Limpieza de datos
df.replace('n/d', pd.NA, inplace=True)
df = df.dropna(subset=['FECHA']) # Eliminar filas sin fecha
# Convertir columnas numéricas
numeric_cols = ['Al04TMin', 'Al04TMed', 'Al04HumMax', 'Al04HumMin',
    'Al04HumMed',
    'Al04VelVientoMax', 'Al04Rad', 'Al04Precip']
```

```
df[numeric_cols] = df[numeric_cols].apply(pd.to_numeric,
                                           errors='coerce')

# Crear columnas de año y mes
df['Año'] = df['FECHA'].dt.year
df['Mes'] = df['FECHA'].dt.month
df['Día'] = df['FECHA'].dt.day

# 1, Análisis de temperaturas
def analizar_temperaturas():
    print("\n === ANÁLISIS DE TEMPERATURAS ===")

    # Temperaturas medias anuales
    temp_anual = df.groupby('Año')['Al04TMed'].mean()
    print("\n º Temperatura media anual:")
    display(temp_anual)

    Asegúrate de que la columna FECHA es de tipo datetime
    if not pd.api.types.is_datetime64_any_dtype(df['FECHA']):
        df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])

    # Extraer el año de la fecha
    df['Año'] = df['FECHA'].dt.year

    # Calcular la media de temperaturas mínimas por año
    temp_min_por_año = df.groupby('Año')['Al04TMin'].mean()

    # Calcular la media de temperaturas máximas por año
    temp_max_por_año = df.groupby('Año')['Al04TMed'].mean()

    # Mostrar los resultados
    print("\n* Media de temperaturas mínimas por año:")
    for año, temp in temp_min_por_año.items():
        print(f"{año}: {temp:.1f}°C")

    print("\n Media de temperaturas máximas por año:")
    for año, temp in temp_max_por_año.items():
        print(f"{año}: {temp:.1f}°C")

    # Calcular la media general de temperaturas mínimas
```

```
media_temp_min = df['Al04TMin'],mean()
# Calcular la media general de temperaturas máximas
media_temp_max = df['Al04TMed'],mean()
# Mostrar los resultados
print(f"\nMedia general de temperaturas mínimas:
      {media_temp_min:,1f}°C")
print(f" Media general de temperaturas máximas: {media_temp_max:,1f}°C")
# Asegúrate de que la columna FECHA es de tipo datetime
if not pd.api.types.is_datetime64_any_dtype(df['FECHA']):
    df['FECHA'] = pd.to_datetime(df['FECHA'])
# Extraer el año de la fecha
df['Año'] = df['FECHA'].dt.year
# Calcular la temperatura mínima de cada año
temp_min_absoluta_por_año = df.groupby('Año')['Al04TMin'].min()
# Calcular la temperatura máxima de cada año
temp_max_absoluta_por_año = df.groupby('Año')['Al04TMed'].max()
# Mostrar los resultados
print("\n* Temperatura mínima absoluta por año:")
for año, temp in temp_min_absoluta_por_año.items():
    print(f"{año}: {temp:,1f}°C")
print("\n Temperatura máxima absoluta por año:")
for año, temp in temp_max_absoluta_por_año.items():
    print(f"{año}: {temp:,1f}°C")

# Temperaturas extremas
#max_temp = df['Al04TMed'].max()
#min_temp = df['Al04TMin'].min()
#print(f"\n Temperatura máxima media: {max_temp:,1f}°C")
#print(f" Temperatura mínima absoluta: {min_temp:,1f}°C")
# Variación mensual
temp_mensual = df.groupby('Mes')[['Al04TMin', 'Al04TMed']].mean()
```

```
print("\n Temperaturas medias mensuales:")
display(temp_mensual)
# Gráficos
plt,figure(figsize=(14, 7))
plt,plot(df['FECHA'], df['Al04TMed'], label='Temperatura Media',
         color='orange', linewidth=1)
plt,plot(df['FECHA'], df['Al04TMin'], label='Temperatura Mínima',
         color='blue', alpha=0,7, linewidth=1)
plt,title('Evolución de Temperaturas en Tabernas', fontsize=14, pad=20)
plt,xlabel('Fecha', fontsize=12)
plt,ylabel('Temperatura (°C)', fontsize=12)
plt,legend(fontsize=12)
plt,grid(True, alpha=0,3)
plt,tight_layout()
plt,show()
# 2, Análisis de humedad
def analizar_humedad():
    print("\n === ANÁLISIS DE HUMEDAD ===")
    # Humedad media anual
    humedad_anual = df.groupby('Año')['Al04HumMed'],mean()
    print("\n≈ Humedad relativa media anual:")
    display(humedad_anual)
    # Variación mensual
    humedad_mensual = df.groupby('Mes')[['Al04HumMin', 'Al04HumMed',
                                         'Al04HumMax']],mean()
    print("\n Humedad relativa mensual:")
    display(humedad_mensual)
    # Gráficos
    plt,figure(figsize=(14, 7))
    plt,plot(df['FECHA'], df['Al04HumMed'], label='Humedad Media',
            color='green', linewidth=1)
```

```
plt,title('Evolución de la Humedad Relativa en Tabernas', fontsize=14,
          pad=20)
plt,xlabel('Fecha', fontsize=12)
plt,ylabel('Humedad Relativa (%)', fontsize=12)
plt,grid(True, alpha=0,3)
plt,tight_layout()
plt,show()
# 3, Análisis de precipitaciones
def analizar_precipitaciones():
    print("\n === ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES ===")
    # Precipitación anual
    precipitacion_anual = df.groupby('Año')['Al04Precip'].sum()
    print("\n Precipitación anual (mm):")
    display(precipitacion_anual)
    # Días de lluvia por año
    dias_lluvia = df[df['Al04Precip'] > 0].groupby('Año').size()
    print("\n Días de lluvia por año:")
    display(dias_lluvia)
    # Meses más lluviosos
    precipitacion_mensual =
        df.groupby('Mes')['Al04Precip'].sum(),sort_values(ascending=False)
    print("\n Precipitación por mes (orden descendente):")
    display(precipitacion_mensual)
    # Gráficos
    plt,figure(figsize=(14, 7))
    df['Al04Precip'].rolling(30).sum().plot(color='blue', linewidth=1)
    plt,title('Precipitación acumulada (30 días) en Tabernas', fontsize=14,
              pad=20)
    plt,xlabel('Fecha', fontsize=12)
    plt,ylabel('Precipitación (mm)', fontsize=12)
    plt,grid(True, alpha=0,3)
    plt,tight_layout()
```

```
plt,show()

# 4, Análisis de viento y radiación
def analizar_viento_radiacion():
    print("\n === ANÁLISIS DE VIENTO Y RADIACIÓN ===")
    # Viento medio anual
    viento_anual = df.groupby('Año')['Al04VelVientoMax'],mean()
    print("\n Velocidad máxima de viento media anual (km/h):")
    display(viento_anual)
    # Radiación solar media anual
    radiacion_anual = df.groupby('Año')['Al04Rad'],mean()
    print("\n Radiación solar media anual (MJ/m²):")
    display(radiacion_anual)
    # Gráficos
    fig, (ax1, ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(14, 10))
    ax1,plot(df['FECHA'], df['Al04VelVientoMax'], color='purple',
            linewidth=1)
    ax1,set_title('Velocidad máxima del viento en Tabernas', fontsize=14,
                pad=15)
    ax1,set_ylabel('Velocidad (km/h)', fontsize=12)
    ax1,grid(True, alpha=0,3)
    ax2,plot(df['FECHA'], df['Al04Rad'], color='red', linewidth=1)
    ax2,set_title('Radiación solar en Tabernas', fontsize=14, pad=15)
    ax2,set_ylabel('Radiación (MJ/m²)', fontsize=12)
    ax2,grid(True, alpha=0,3)

plt,tight_layout()
plt,show()

# 5, Correlaciones entre variables
def analizar_correlaciones():
    print("\n === CORRELACIONES ENTRE VARIABLES ===")
    # Matriz de correlación
```

```
corr_matrix = df[['Al04TMed', 'Al04HumMed', 'Al04VelVientoMax',  
                 'Al04Rad', 'Al04Precip']],corr()  
print("\n Matriz de correlación:")  
display(corr_matrix)  
# Gráfico de correlación  
plt,figure(figsize=(10, 8))  
sns,heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', center=0,  
            fmt=",2f",  
            annot_kws={"size": 12}, cbar_kws={"shrink": 0,8})  
plt,title('Correlación entre Variables Meteorológicas', fontsize=14,  
          pad=20)  
plt,xticks(fontsize=12)  
plt,yticks(fontsize=12)  
plt,tight_layout()  
plt,show()  
# Gráfico de correlación  
plt,figure(figsize=(10, 8))  
sns,heatmap(corr_matrix, annot=True, cmap='coolwarm', center=0,  
            fmt=",2f",  
            annot_kws={"size": 12}, cbar_kws={"shrink": 0,8})  
plt,title('Correlación entre Variables Meteorológicas', fontsize=14,  
          pad=20)  
plt,xticks(fontsize=12)  
plt,yticks(fontsize=12)  
plt,tight_layout()  
plt,show()
```