



**9CFE-1433**

Actas del Noveno Congreso Forestal Español  
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**  
ISBN: 978-84-941695-7-1

Organiza





## Diseño y desarrollo de una colmena digitalizada con aislamiento de corcho natural.

PRADO-JIMENO, R. (1), CASADO-SANZ, M. (1) y FUENTES-PÉREZ, J.F. (1)

(1) Universidad de Valladolid - iuFOR

### Resumen

El sector apícola se centra cada vez más en crear un entorno natural y optimizado para el ciclo biológico de las abejas, con el objetivo de reducir la dependencia de factores externos, especialmente en un contexto de cambio climático. Mejorar las condiciones térmicas dentro de la colmena puede aumentar la supervivencia y producción apícola. El mercado actual ofrece principalmente colmenas construidas con madera de pino. Algunas iniciativas han comenzado a incorporar materiales aislantes como el poliestireno. Sin embargo, un problema de los materiales sintéticos, a pesar de ser excelentes aislantes térmicos, es su incompatibilidad con la producción ecológica de alimentos, su baja sostenibilidad y su resiliencia en el medio. El objetivo de esta investigación ha sido desarrollar una colmena con aislante basada en el estudio de diferentes fibras naturales, así como incorporar una red sensorial para monitorizar las variables ambientales en el apiario y verificar la mejora del aislamiento del prototipo diseñado. Los resultados de campo han demostrado que las colmenas con aislamiento de corcho aumentan significativamente la producción de miel.

### Palabras clave

Abejas, aislamiento térmico, apicultura, corcho aglomerado, red sensorial

### 1. Introducción

La abeja melífera *Apis mellifera* Linnaeus, 1758, es uno de los organismos más importantes del mundo por su contribución a la polinización del 35% de la producción global de cultivos, junto a otros polinizadores (KLEIN *et al.*, 2007). El valor monetario de este servicio ecosistémico se ha estimado en 351.000 millones de dólares (USD) al año (LAUTENBACH *et al.*, 2012). Además, el 90% de las plantas silvestres tienen estrategias de polinización por animales generalistas (PETANIDOU *et al.*, 2008); por lo tanto, la abeja melífera contribuye directamente a mantener la biodiversidad de la flora. Sin embargo, la abeja melífera es también una de las especies más impactadas por el cambio global, viéndose seriamente afectada por los productos agroquímicos nocivos (RICKE *et al.*, 2021) y la aparición de especies invasoras como *Varroa destructor* Anderson y Trueman, 2000 (ROSENKRANZ *et al.*, 2010) o *Vespa velutina* Lepeletier, 1836 (LEZA *et al.*, 2019), y el calentamiento global (LE CONTE y NAVAJAS, 2008; FLORES *et al.*, 2019; CUNNINGHAM *et al.*, 2022), entre otros factores.

El desarrollo del sector apícola ha estandarizado las dimensiones internas de las colmenas a un tamaño de marco regular y se fabrican principalmente con maderas blandas, pino y abeto en su mayoría (DUPLÉIX *et al.*, 2020; RUBIANO-NAVARRETE *et al.*, 2022). Las colmenas más corrientes tienen marcos móviles (BEETSMA, 1994), y existen diversas variantes, como Langstroth, Dadant y Layens, en función de sus dimensiones y/o de la posición de sus módulos. La colmena Langstroth, creada en 1852, es la más utilizada (KUMAR GUPTA *et al.*, 2014). La madera se ha impuesto



como el material más utilizado en apicultura por sus buenas propiedades mecánicas, su estabilidad, su facilidad de mecanización, su asequibilidad y sus satisfactorias propiedades aislantes. Sin embargo, existen otros materiales orgánicos, como el corcho o los paneles de fibra de madera, que podrían ofrecer propiedades aislantes superiores.

En las últimas décadas se han desarrollado y probado colmenas fabricadas con materiales sintéticos como el poliestireno y el poliuretano, que ofrecen mejores resultados en climas fríos (ERICKSON y SALWEI, 2020; FLORIS *et al.*, 2020; ALBURAKI y CORONA, 2021). Las colmenas de poliestireno presentan un mayor aislamiento térmico en comparación con las convencionales, sin embargo, suponen importantes desventajas: su mayor precio (SADIA *et al.*, 2021), menor durabilidad (ERDOĞAN, 2019), menor sostenibilidad (DUPLÉIX *et al.*, 2020) asociada a contaminación del medio por microplásticos (SIDDIQUI *et al.*, 2023) y su prohibición para la producción ecológica (UNIÓN EUROPEA, 2018). Además, las colmenas excesivamente aisladas del entorno exterior pueden tener problemas de sobrecalentamiento interno, que no siempre se pueden mitigar eficazmente con los comportamientos reguladores naturales de las abejas (BOURLIÈRE y CHAUVIN, 1968). También se ha investigado sobre el desarrollo de nuevos materiales, como el ferrocemento (HOBSON JR, 1983), el mortero de cemento y vermiculita (NEVES, 2002; LORENZON *et al.*, 2004) o la arcilla reforzada (LEPKOVA *et al.*, 2022).

Por el contrario, las colmenas convencionales de madera no presentan estos inconvenientes. Históricamente, la construcción de colmenas ha estado influida por la disponibilidad de materiales adecuados, como señala CRANE (1999). Estos materiales iban desde los terrestres, como el barro secado al sol y la arcilla cocida, hasta los de origen vegetal, como troncos huecos, corteza de corcho, cilindros tejidos, tallos entablillados y tablas de madera. En las zonas mediterráneas se utilizaban habitualmente cilindros de corteza de corcho. Conocido por sus propiedades aislantes superiores a las de la madera, el corcho ha desempeñado tradicionalmente un papel importante en la construcción de colmenas. Aunque el corcho fue uno de los primeros materiales utilizados para fabricar colmenas junto con la arcilla cocida, el mimbre o los troncos huecos (CRANE, 1994), se encuentran pocas publicaciones con colmenas que aprovechen la incorporación de estos aislamientos de fibras naturales en diseños modernos. FLORIS *et al.* (2020) analizaron colmenas de madera con corcho aglomerado mediante un trabajo de campo en Cerdeña (Italia) y evaluaron la termorregulación de la temperatura interior de colmenas de madera y colmenas que incorporaban 3 cm de esta fibra natural en su interior, consiguiendo un patrón de temperatura diaria más regular.

Teniendo en cuenta todo ello, el objetivo de este estudio es realizar un análisis comparativo en laboratorio de materiales aislantes naturales en una colmena tipo Langstroth sometida a una fuente de calor controlada. El estudio compara la evolución de la humedad y la temperatura mediante sensores tanto en el interior como en el exterior de las colmenas. Además, aprovechando esta oportunidad, también se ha probado una nueva red de sensores basada en tecnología abierta. Esta red monitorizará las variables ambientales internas y externas de las colmenas, ofreciendo precisión y asequibilidad frente a las alternativas disponibles, como el World Bee Project CIC (WBP), el proyecto eslovaco Bee Hive Monitoring a partir de 2022, y diversas empresas que venden sensores listos para su integración en las colmenas, como BuzzBox (Denver, CO, EE.UU.) y Hive Watch (Tann, Suiza), entre otras. La red desarrollada tiene en cuenta las circunstancias únicas del sector apícola en la Península Ibérica, concretamente la falta de

comunicaciones fiables debido a la orografía de la región, el envejecimiento demográfico del sector y la prevalencia de inmigrantes digitales.

## 2. Objetivos

El objetivo de esta investigación ha sido por una parte desarrollar una colmena aislante mediante el estudio del comportamiento aislante térmico de diferentes fibras naturales, y, por otra parte, incorporar una red sensorial para monitorizar las variables ambientales en el colmenar y verificar la mejora aislante del prototipo diseñado.

## 3. Metodología

### 3.1. Ensayo de laboratorio con fuente de calor externa.

Para estudiar el comportamiento térmico aislante de diferentes fibras naturales, se seleccionó el modelo de colmena Langstroth de cuadros móviles, ampliamente utilizado a nivel mundial. La elección de los materiales aislantes se basó en criterios de sostenibilidad, disponibilidad regional y seguridad, priorizando alternativas naturales frente a aislantes sintéticos como el poliestireno extruido. Aunque este último ofrece excelentes propiedades aislantes, presenta desventajas significativas, como su mayor coste (SADIA *et al.*, 2021), menor durabilidad (ERDOĞAN, 2019), menor sostenibilidad (DUPLÉIX *et al.*, 2020) y su prohibición en la producción ecológica (UNION EUROPEA, 2018). Con estas premisas, se seleccionaron cuatro materiales aislantes de origen natural con propiedades térmicas específicas: corcho negro aglomerado, corcho blanco aglomerado, fibras de madera y lana mineral de roca. Las propiedades de estos materiales se detallan en la *Tabla 1*.

*Tabla 1. Características de los materiales aislantes probados.*

| Material                            | Espesor (mm) | Densidad         | (kg/m <sup>3</sup> ) | Conductividad térmica | (W / (m · K))         | Referencia                |
|-------------------------------------|--------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| Fibra de madera                     |              | STEICO Roundtrip | 8                    | 60                    | 0.038                 | AISLANTES DE MADERA, 2023 |
| Corcho aglomerado blanco            | 10           | 200–220          | 0.045                |                       | BRICORK, 2023         |                           |
| Corcho aglomerado negro             | 13           | 100–120          | 0.036–0.038          |                       | ZERO6, 2023           |                           |
| Ultracoustic R Lana mineral de roca | 8            | 32               | 0.032                |                       | KNAUFINSULATION, 2023 |                           |

Los ensayos de aislamiento térmico se llevaron a cabo en un entorno controlado, utilizando una cámara de madera construida a medida y equipada con una fuente de calor regulable (dos lámparas infrarrojas de 250 W) tal como se muestra en la *Figura 1*. Dentro de la cámara se colocaron colmenas equipadas con cada tipo de aislamiento, aplicando dicho aislamiento en las paredes laterales y bajo la tapa. También se incluyó una colmena de control sin aislamiento, analizando por tanto cinco configuraciones diferentes. Cada experimento consistió en un ciclo de calentamiento a una temperatura objetivo de 60 °C durante 3 horas. Este valor fue seleccionado para superar la máxima temperatura ambiental registrada (56,7 °C; EL FADLI *et al.*, 2013) y aproximarse a la temperatura de fusión de la cera (60–65 °C; BERNAL *et al.*, 2005; KABIR y YOLA, 2020). Entre experimentos, se permitió que

la cámara volviera a la temperatura ambiental antes de iniciar un nuevo ciclo.

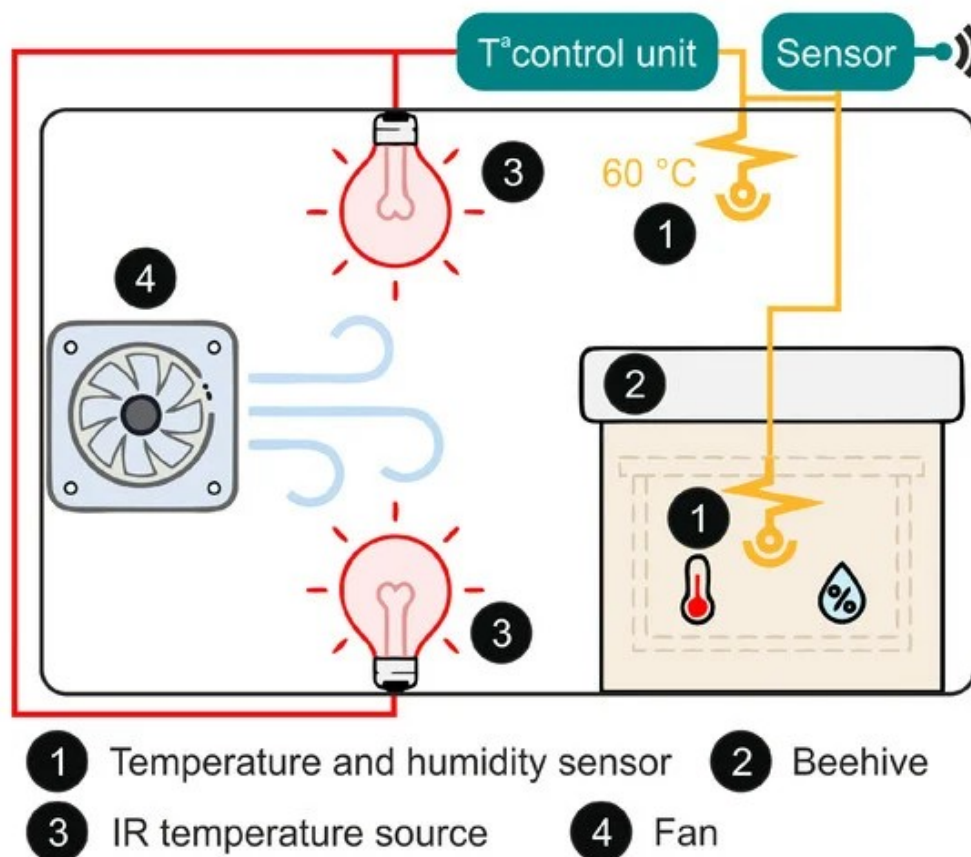


Figura 1. Esquema de la caja donde se realizaron las pruebas con las lámparas y los sensores de humedad y temperatura en el exterior y el interior de la colmena.

La regulación de la temperatura se logró mediante un sistema de control basado en una placa microcontroladora M0, un termómetro digital y un conjunto de relés. Este sistema mantuvo la temperatura con una precisión de  $\pm 1$  °C, apoyado por ventiladores que aseguraron una distribución uniforme del calor. Cada tipo de aislamiento fue sometido a tres réplicas experimentales, resultando en un total de 18 experimentos (6 configuraciones  $\times$  3 repeticiones). La monitorización de la temperatura y la humedad dentro de las colmenas y la cámara se realizó cada 30 segundos mediante un nodo sensor personalizado. Este nodo, desarrollado para la investigación, cuenta con la placa MC Sentinel V1.1 diseñada por la Universidad de Valladolid. La placa integra un microcontrolador ESP32, un RTC (DS3231), soporte para tarjetas SD y un sistema de autoalimentación (MYCIRCUITS, 2023). Además, incluye un módulo de radio LoRa (ADAFRUIT, 2023) y soporta una batería de litio con autonomía de un año (transmisión cada 15 minutos). Para la monitorización interna se utilizó un sensor SHT31 (SENSIRION, 2023), mientras que las variables externas fueron medidas con los sensores AHT20 (ASAIR, 2023) y BMP280 (BOSCH SENSORTTEC, 2023). El nodo registra los datos en una tarjeta SD y los transmite a un *gateway* mediante comunicación LoRa. El *gateway*, configurada con una placa ESP32 y un módulo LoRa, envía los datos a un servidor en tiempo real. Adicionalmente, se probó una arquitectura más robusta, basada en un ordenador monoplaca Raspberry Pi 4, un microcontrolador Atmel ATSAMD21G18 y un módem 4G, diseñada para entornos más exigentes (FUENTES-PÉREZ et al., 2021).



Todo el sistema fue programado en C mediante el IDE de Arduino. El flujo de trabajo sincroniza las transmisiones de datos, conservando energía en los nodos mediante apagados temporales. Si un nodo no responde, el *gateway* intenta la comunicación de forma recursiva antes de emitir una alarma de gestión. Los datos recopilados se almacenan localmente y en un servidor en línea (mediante consultas HTTPS y MySQL), permitiendo su evaluación a largo plazo.

En una etapa posterior la misma red sensorial de hardware abierto fue utilizada en campo con objeto de registrar y transmitir en tiempo real datos ambientales, incluidos temperatura y humedad, con el fin futuro de mejorar la gestión apícola gracias a aplicaciones prácticas como la supervisión de riesgos de sobrecalentamiento (KABIR y YOLA, 2020; BERNAL *et al.*, 2005), la estimación precisa de los tiempos de búsqueda de alimento de las abejas (CORBET *et al.*, 1993; SZABO, 1980), la anticipación de eventos de enjambrazón (FERRARI *et al.*, 2008), la detección de la formación de agrupaciones invernales (STABENTHEINER *et al.*, 2003) o el riesgo de aparición de enfermedades como la ascosferosis (FLORES *et al.*, 1996).

### 3.2. Ensayo de campo con abejas.

Se instalaron seis colmenas de estudio en un apiario localizado en Valencia de Don Juan (León), incorporando colonias de abejas y una red sensorial para la recolección de datos a distancia. Tres de las colmenas se utilizaron como controles, mientras que las otras tres fueron equipadas con una camisa exterior aislante de corcho aglomerado blanco, seleccionado por su facilidad de corte y su resistencia a las condiciones meteorológicas a lo largo del tiempo. Ambas configuraciones se situaron en el centro del apiario, minimizando así el efecto borde sobre la deriva de las abejas (PFEIFFER y CRAILSHEIM, 1998).

Las colonias de abejas procedían de enjambres obtenidos en el mismo año, con misma procedencia genética y tamaño poblacional similar. Todas las colonias recibieron un manejo estandarizado durante la temporada apícola, que incluyó alimentación suplementaria en períodos desfavorables, como el invierno, tratamiento veterinario contra el parásito *Varroa destructor* Anderson y Trueman, 2000, y la recolección de productos al final del verano. En este momento, se midió la producción de miel y propóleo mediante el pesaje manual de los cuadros llenos de miel, excluyendo a las abejas. El peso neto de miel por cuadro se obtuvo restando al peso total el peso promedio de un cuadro vacío después de la extracción de miel.

### 3.3. Análisis de datos.

En el ensayo de laboratorio, cada prueba con un diferente aislante se realizó tres veces. Para garantizar la coherencia y facilitar las comparaciones entre experimentos, alcanzada la temperatura de 60°C en la cámara estanca, se calculó la actividad térmica dentro de la colmena basándose en el área bajo la curva de temperatura desde el momento en que se alcanzaban 22 °C en el interior de la colmena, hasta 1 h después y se registró la temperatura máxima alcanzada. Este método se aplicó uniformemente en todas las réplicas para evaluar la eficacia de aislamiento térmico de los distintos materiales. Los datos se recogieron y almacenaron en archivos de texto independientes para cada prueba. Las evaluaciones gráficas iniciales de estos archivos ayudaron a determinar el inicio

del experimento cuando se alcanzó la temperatura objetivo en la cámara. El principal parámetro de comparación fue la temperatura, ya que no se aplicó ningún mecanismo de control de la humedad durante los experimentos. Sin embargo, se registraron datos de humedad que pueden ser pertinentes para futuros estudios o aplicaciones específicas.

El análisis estadístico se realizó utilizando R versión 4.4.1 (R CORE TEAM, 2024), empleando un análisis de varianza (ANOVA) con el paquete “stats” versión 4.4.1 para determinar las diferencias significativas entre el rendimiento de los materiales aislantes, garantizando un análisis comparativo sólido. Este método se eligió específicamente por su capacidad para manejar la varianza dentro de los grupos y entre ellos, lo que resulta ideal para nuestro diseño experimental. Tras la identificación de efectos significativos a través del ANOVA, con el paquete “agricolae” versión 1.3-7 (DE MENDIBURU, 2023) se utilizó la prueba de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher como análisis post hoc para explorar más a fondo las diferencias por pares entre las medias de los grupos.

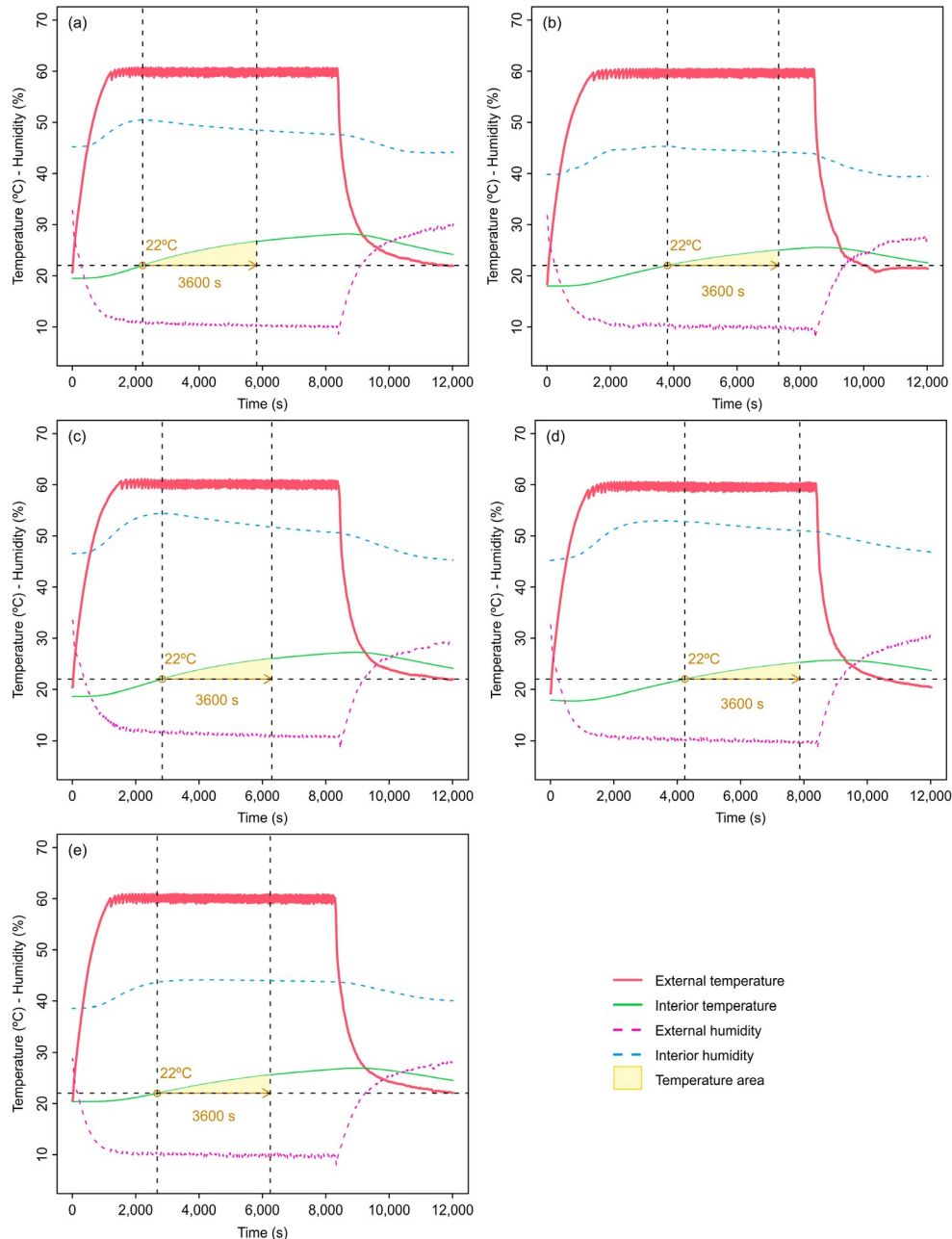
En el ensayo de campo, se evaluaron las variables producción de miel y producción de propóleo en las tres réplicas correspondientes a cada tratamiento (control y material aislante). Estas variables fueron analizadas mediante un análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre los tratamientos. Al tratarse de únicamente dos grupos (colmena control y colmena aislante) no se aplicó ningún procedimiento post hoc, por no ser necesario dicho estadístico para examinar de manera detallada las diferencias por pares entre las medias de los grupos.

En cuanto a la integridad de los datos, no se detectaron errores en el procedimiento de adquisición de los datos, examinando los posibles valores atípicos para determinar si se debían a errores experimentales o a auténticas anomalías. Dado que las condiciones experimentales estaban muy controladas, las desviaciones significativas fueron escasas. En ausencia de valores atípicos, no se excluyó ningún dato del análisis.

### 3. Resultados

#### 3.1. Ensayo de laboratorio con fuente de calor externa.

Los resultados brutos de los ensayos de laboratorio de aislamiento exterior para cada material aislante se muestran en la *Figura 2*. La evolución de las distintas variables monitorizadas es similar entre todos los materiales. El gráfico ilustra la evolución de la temperatura y la humedad tanto en el interior como en el exterior (es decir, en la cámara) de la colmena a lo largo del periodo de prueba. En todos los casos, la temperatura exterior aumenta rápidamente, mientras que la temperatura interior de la colmena aumenta de forma más gradual, lo que demuestra las propiedades aislantes de las colmenas. Del mismo modo, la humedad exterior disminuye rápidamente debido a la ausencia de un sistema de control de la humedad, lo que permite que ésta escape fácilmente de la cámara. En el interior de la colmena, la humedad aumenta inicialmente debido al limitado intercambio de aire con la cámara, pero finalmente empieza a disminuir a medida que el aire interior empieza a intercambiarse más activamente con la cámara.



*Figura 2. Representación gráfica de las variables de temperatura y humedad interior y exterior obtenidas en el ensayo de laboratorio para (a) colmena de control, (b) colmena de lana mineral de roca, (c) colmena de fibra de madera, (d) colmena de corcho aglomerado negro y (e) colmena de corcho aglomerado blanco. El área amarilla se ha calculado a 22 °C en el interior y durante un tiempo de 1 h para comparar la capacidad aislante de cada material.*

El área global de temperatura acumulada para todos los materiales es menor que la del experimento de control. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a efectos de comparación, los materiales comercializados empleados tenían espesores diferentes, por lo que fue necesario aplicar una normalización mediante la ratio área / espesor. Del mismo modo, debido a factores externos como la temperatura inicial fuera de la cámara, es esencial empezar a comparar los materiales a una temperatura constante (22 °C). Dado que esta temperatura se alcanzó en momentos distintos desde el inicio del experimento, resulto necesario establecer tiempos de

inicio diferentes para cada uno.

Los resultados son consistentes entre experimentos y materiales sin diferencias significativas entre réplicas. La integración de variables entre materiales, junto con estadísticas descriptivas y un análisis de varianza para las variables «área/espesor» y «temperatura máxima tras 1 h de exposición a 60 °C», se muestran en la *Tabla 2*.

*Tabla 2. Estadística descriptiva y resultados del ANOVA para las variables: área/espesor y temperatura interior tras 1 h a 60 °C (\* p-valor < 0,05). La última columna resume la comparación por pares tras LSD de Fisher.*

| Variable                                    | Material                 | $\bar{x}$ | SD                       | CV (%) | <i>p</i> | -valor | Comparación por pares |
|---------------------------------------------|--------------------------|-----------|--------------------------|--------|----------|--------|-----------------------|
| <b>Área /<br/>espesor</b>                   | Corcho aglomerado blanco | 234.547   | 27.67                    | 11.799 | 0.0000 * |        | ab                    |
|                                             | Corcho aglomerado negro  | 188.473   | 16.23                    | 8.615  |          | a      |                       |
|                                             | Lana mineral de roca     | 255.197   | 4.709                    | 1.845  |          | ab     |                       |
|                                             | Fibras de madera         | 218.227   | 32.12                    | 14.719 |          | b      |                       |
|                                             | Control                  | 418.137   | 38.174                   | 9.129  |          | c      |                       |
| <b>Tª interior<br/>tras 1 h a 60<br/>°C</b> | Corcho aglomerado blanco | (°C)      | Corcho aglomerado blanco | 26.14  | 0.470    | 1.799  | 0.0071 * a            |
|                                             | Corcho aglomerado negro  | 25.57     | 0.278                    | 1.090  |          | a      |                       |
|                                             | Lana mineral de roca     | 26.093    | 0.090                    | 0.347  |          | a      |                       |
|                                             | Fibras de madera         | 25.563    | 0.524                    | 2.053  |          | a      |                       |
|                                             | Control                  | 26.967    | 0.402                    | 1.493  |          | b      |                       |

Los resultados del ANOVA detectan diferencias significativas entre los diferentes aislantes tanto para la variable área/espesor ( $p$ -valor < 0,0001) como para la Tª interior tras 1 h a 60 °C ( $p$ -valor = 0,0071). La aplicación de pruebas a posteriori mediante la comparación por pares con LSD de Fisher muestra diferencias significativas entre todos los grupos de la variable área/espesor, aunque en el caso de la “Tª interior tras 1 h a 60°C” únicamente detecta diferencias significativas entre la colmena control y el resto de los aislantes utilizados en el ensayo de laboratorio.

La variable área / espesor con diferencias significativas entre grupos, muestra la siguiente distribución de las medias de menor a mayor valor: corcho aglomerado negro < fibras de madera < lana mineral de roca < corcho aglomerado blanco. Esta distribución de menor a mayor valor también se produce en la variable “Tª interior tras 1 h a 60 °C” a pesar de no detectarse en este caso diferencias significativas más que entre la colmena control y el resto de los aislantes. En definitiva, cualquiera de los aislantes seleccionados ofrece diferencias significativas de rendimiento en comparación con la colmena control, que carece de aislamiento.

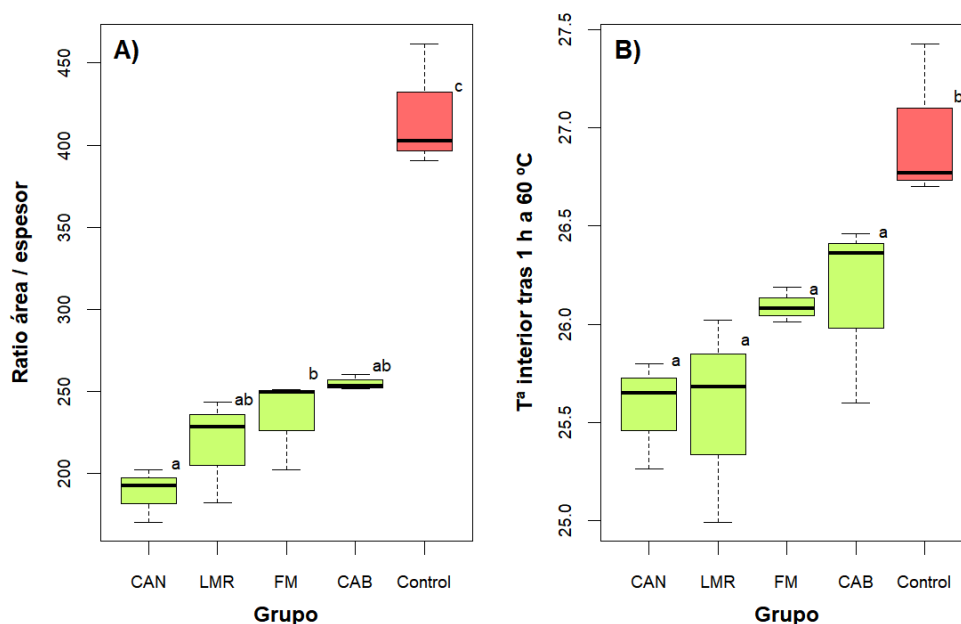


Figura 3. (a) Gráfico con medias de la relación área/espesor para cada tipo de material aislante. (b) Gráfico con medias de la temperatura interior máxima tras 1 h a 60 °C de temperatura exterior para cada tipo de material aislante: Control, FM (fibras de madera), LMR (lana mineral de roca), CAN (corcho aglomerado negro) y CAB (corcho aglomerado blanco).

### 3.2. Ensayo en campo con abejas.

La producción de miel por colmena presentó diferencias significativas entre los dos tipos de colmenas evaluados, de acuerdo con el análisis de varianza (ANOVA) realizado ( $p = 0,0454$ ), logrando las colmenas aislantes con corcho una media de 62,9 kg mientras que la media de las colmenas control se situó en 26,1 kg. Sin embargo, no se detectó una producción de propóleo significativa ( $p = 0,644$ ), a pesar de alcanzar las colmenas aislantes una producción media de 158,3 g y 101,7 g en las colmenas control (Figura 4). A continuación, se muestran los resultados del estadístico ANOVA empleado y una representación gráfica de los resultados (Figura 4).

Tabla 2. Estadística descriptiva y resultados del ANOVA para las variables: producción de miel (kg) y producción de propóleo (kg).

| Variable                   | Material         | $\bar{x}$ | SD     | CV (%) | $p$    | -valor |
|----------------------------|------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|
| Producción de miel (kg)    | Colmena aislante | 62,938    | 20,378 | 32,378 | 0.0454 | *      |
|                            | Colmena control  | 26,066    | 16,677 |        |        |        |
| Producción de propóleo (g) | Colmena aislante | 158,333   | 29,297 | 18,504 | 0.644  |        |
|                            | Colmena control  | 101,667   | 72,514 |        |        |        |

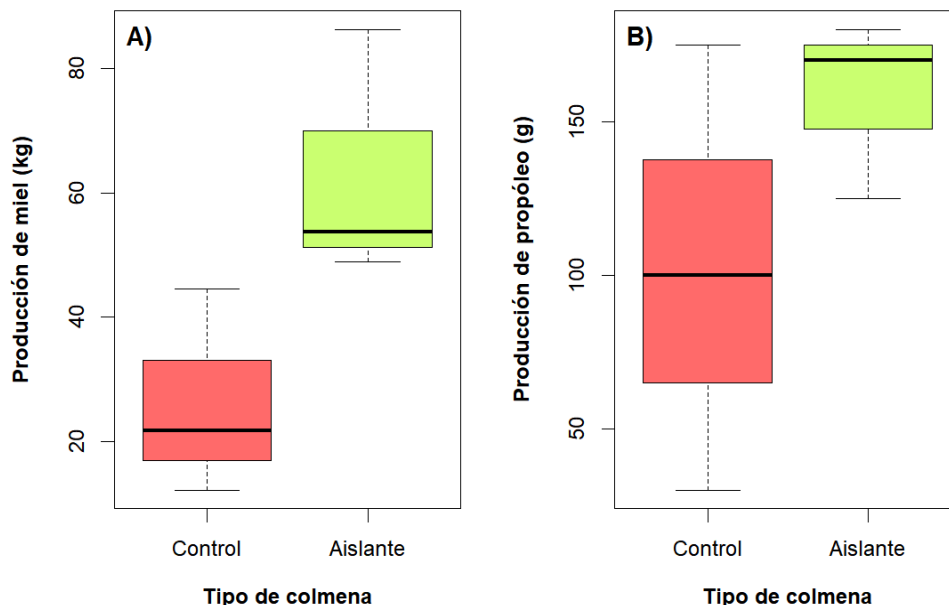


Figura 4. (A) Gráfico con la producción de miel por tipo de colmena. (B) Gráfico con la producción de propóleo por tipo de colmena.

#### 4. Discusión

En el ensayo de laboratorio, las colmenas aislantes lograron una menor variación de temperatura y una menor relación área/espesor, mostrando una mayor capacidad de aislamiento con las fibras naturales seleccionadas. Los materiales elegidos en este estudio han demostrado su eficacia como aislantes térmicos de calidad con baja transmitancia térmica. Esto garantiza que el calor dentro de las colmenas se mantenga a temperaturas inferiores a las de la colmena de control durante toda la prueba de 60 minutos. Según los resultados, el corcho negro aglomerado y la lana mineral de roca ofrecen los mejores valores de aislamiento en comparación con los demás materiales. Sin embargo, como indica el análisis ANOVA que compara las áreas relativas al espesor de la capa aislante, no existen diferencias significativas entre los cuatro materiales naturales elegidos, que presentan comportamientos similares. Sin embargo, muestran diferencias marcadas y significativas cuando se comparan con la colmena de control (como se ve en la *Tabla 2* y en la *Figura 4*). Cada material estudiado mejora proporcionalmente el aislamiento, por lo que la decisión final sobre qué material utilizar en la colmena debe considerar otros factores relevantes como la disponibilidad en el mercado, el coste y las propiedades de mecanización.

En el ensayo de campo, las colmenas aislantes de corcho instaladas bajo las mismas condiciones logran una mayor producción de miel significativa frente a las colmenas control. Esta mayor productividad está relacionada nuevamente con un mejor aislamiento térmico del material utilizado, traducido en un menor gasto energético por la colonia de abejas para lograr la homeostasis.

Tanto los resultados de laboratorio como los del ensayo de campo presentados en este estudio coinciden con las conclusiones de FLORIS *et al.* (2020), donde las colmenas con corcho aglomerado presentaban menos fluctuaciones térmicas a lo largo del día y requerían menos tiempo para que las abejas alcanzaran la temperatura deseada tras abrir la colmena. Mantener una temperatura interna óptima es vital para la habitabilidad de la colmena: la temperatura interna ideal



para el nido de cría oscila entre 32 y 36 °C (SEELEY, 1981), 34 y 35 °C (FREE, 1980), y 30,7 y 37 °C (KRAUS, 1998), pero la exposición prolongada a temperaturas internas superiores a 38 °C afecta negativamente a la metamorfosis de las larvas y al crecimiento de las crías y acorta la vida de las abejas adultas (HIMMER, 1927). El aislamiento logrado en las colmenas con aislante de corcho en comparación a las colmenas control, se puede traducir en un menor gasto energético de la colonia de abejas para combatir las fluctuaciones de temperatura externas, función especialmente importante en la época estival, cuando las abejas tienen que buscar agua para nebulizarla en el interior de la colmena, reduciendo así la temperatura por evaporación (VON FRISCH *et al.*, 2014; LINDAUER, 1971). Este proceso de regulación de la temperatura requiere un gasto energético por parte de las abejas, que consiguen consumiendo miel, lo que afecta directamente a la productividad de la colonia. Por lo tanto, en un contexto más amplio, dado el aumento de las temperaturas debido al cambio climático, los resultados apoyan la priorización del diseño de colmenas que utilicen aislantes naturales para contrarrestar eficazmente las altas temperaturas estivales.

Si bien, en términos medios, se produjo más propóleo en las colmenas con aislante, a nivel estadístico no mostró diferencias significativas. Esta falta de variación significativa podría estar influenciada por varios factores que introducen variabilidad en los resultados. Un factor relevante es el comportamiento de sellado de la colmena con propóleo al aproximarse el invierno, una estrategia para minimizar la pérdida de calor (JARIMI *et al.*, 2023). Por tanto, era esperable esperar un sellado más intensivo en las colmenas sin aislamiento (grupo de control) de este estudio. Sin embargo, RIBEIRO-PEREIRA *et al.* (2015) no encontraron correlación directa entre temperatura ambiental y producción de propóleo. Otro factor podría ser la población de la colonia, ya que solo una pequeña porción de la colonia (1-3%) se dedica a la recolección de propóleo. Así mismo, factores como la comunidad botánica, la genética, el clima, la estructura interna de la colmena o la presencia de enfermedades (MOUNTFORD-MCAULEYA *et al.*, 2020) también pueden influir. Sin embargo, estos aspectos no deberían variar entre los tratamientos de aislamiento contrastados, ya que se aseguraron condiciones homogéneas para estos factores.

La red de sensores desarrollada supervisó eficazmente los niveles de temperatura y humedad tanto en interiores como en exteriores, y tiene potencial para integrar sensores adicionales con el fin de supervisar una gama más amplia de parámetros ambientales desde un único nodo. El sistema utilizado en nuestro estudio se basa en plataformas robustas utilizadas anteriormente en aplicaciones de investigación fluvial (FUENTES-PÉREZ *et al.*, 2021). Diseñado para un bajo mantenimiento y una alta durabilidad, emplea nodos base de radio en lugar de WiFi para garantizar un amplio alcance, y cuenta con una *gateway* centralizada para una transmisión de datos eficiente. Tanto los nodos como las pasarelas se basan en tecnología de código abierto, lo que hace que el sistema no sólo sea personalizable, sino que también fomenta la participación de la comunidad en su mejora. Durante el despliegue de esta tecnología, no observamos lagunas en el conjunto de datos ni anomalías. La red se está sometiendo actualmente a pruebas de campo a largo plazo para seguir evaluando su rendimiento. Además, nuestro objetivo era que esta tecnología fuera asequible, con un coste inferior a 100 euros por colmenar. Esta estrategia de precios reduciría significativamente la barrera de entrada en comparación con las tecnologías existentes, haciendo accesible la monitorización avanzada a una gama más amplia de apicultores y proporcionando oportunidades de bricolaje para los usuarios con más conocimientos técnicos.

## 5. Conclusiones

La hipótesis inicial del estudio, que las colmenas aisladas con materiales específicos mostrarían propiedades de aislamiento superiores a las colmenas control, ha sido corroborada.

El ensayo de laboratorio ha encontrado resultados significativos en la variable “área / espesor” entre todos los aislantes evaluados, y diferencias únicamente entre la colmena control y la colmena aislada con los materiales ensayados para la “T<sup>a</sup> interior tras 1 h a 60°C”. Ambos parámetros son indicativos del comportamiento térmico de los materiales en el experimento y demuestran que los aislantes incluidos proporcionan un aislamiento térmico superior en comparación a una colmena control. Cada material estudiado mejora proporcionalmente el aislamiento, por lo que la decisión final para su utilización debe considerar factores como la disponibilidad, el coste y las propiedades de mecanización.

El ensayo de campo ha detectado una producción de miel significativamente mayor en las colmenas con aislante frente a las colmenas control, excepto en la producción de propóleo, donde no se hallaron diferencias significativas.

La investigación presentada muestra la mejora potencial de las colmenas Langstroth de madera convencionales mediante la integración de una capa de materiales de fibra lignocelulósica utilizados como aislante térmico. Estos materiales tienen el potencial de mantener la homeostasis dentro de la colmena durante periodos térmicamente desfavorables como la época estival e invernal, mitigando el gasto energético de la colonia. Nuestro estudio sistemático, en el que se incorporaron materiales de fibra lignocelulósica a una colmena clásica, demostró que cualquier colmena puede reequiparse sin esfuerzo para mejorar sus propiedades aislantes.

Además, se ha desarrollado una red de sensores económicamente asequible, que facilita la monitorización remota de la colmena. La red de sensores de bajo coste y la arquitectura de comunicación implementadas han tenido un rendimiento adecuado, lo que demuestra su potencial de uso en condiciones de campo. Con el objetivo de evaluar su durabilidad en el tiempo, así como el impacto del aislamiento en un rango temporal más amplio, esta red continúa monitorizando el colmenar en estudio.

Los resultados del estudio son prometedores al indicar que la incorporación de aislamiento en la colmena permite una regulación térmica más estable frente a las fluctuaciones de temperatura externas con el potencial de mejorar la calidad de vida de las abejas, garantizando una mejor supervivencia frente al cambio climático o las condiciones meteorológicas inestables y proporcionando beneficios directos para el apicultor.

Mediante la mejora del aislamiento y la integración de la tecnología de sensores, pretendemos proporcionar a los apicultores mejores herramientas para gestionar la salud de las colmenas y adaptarse a los cambios ambientales, mejorando así tanto el confort térmico como el bienestar general de las abejas.

Los resultados del estudio sugieren que sí es posible mejorar el aislamiento de las colmenas y monitorizarlas en tiempo real para seguir el ciclo diario dentro de cada colmena. Por consiguiente, estos hallazgos contribuirán directamente a la conservación y gestión adaptativa de las colmenas sobre el terreno. Esto tendría implicaciones directas para la supervivencia de las abejas, el aumento potencial de



la producción y la reducción de los costes derivados de acciones de gestión innecesarias

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación General de la Universidad de Valladolid la concesión de dos pruebas de concepto para financiar los prototipos de colmena con los materiales estudiados en campo y la concesión de un premio Prometeo para el desarrollo del prototipo. También agradecen el apoyo recibido para la extensión de su investigación en aislamiento de colmenas con aplicación en campo, gracias a la concesión del Proyecto “Reactiva Brañosa” (BF220), que cuenta con el apoyo de la Fundación Biodiversidad del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), financiado por la Unión Europea – NextGenerationEU. (1/01/2024 a 21/12/2025). La contribución de J.F. Fuentes-Pérez ha sido financiada por el programa de investigación e innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención Marie Skłodowska-Curie nº 101032024 (Smart Fishways). La contribución de R. Prado-Jimeno ha sido financiada por la beca del Consejo Social de la Universidad de Valladolid. Adicionalmente los autores también quieren agradecer a Jose Alberto su compromiso y colaboración en la construcción de los diferentes prototipos y elementos de prueba.

## 7. Bibliografía

- ADAFRUIT; 2023. Adafruit RFM69HCW and RFM9X LoRa Packet Radio Breakouts. Disponible en: <https://learn.adafruit.com/adafruit-rfm69hwc-and-rfm96-rfm95-rfm98-lora-packet-padio-breakouts>
- AISLANTES DE MADERA; 2023. STEICO Roundtrip. Disponible en: <https://aislantesmadera.es/featured-content/steico-roundtrip>
- ALBURAKI, M.; CORONA, M.; 2021. Polyurethane honey bee hives provide better winter insulation than wooden hives. *J Apic Res* 61(2) 190–196
- ASAIR; 2023. AHT20 Integrated temperature and humidity Sensor-Sensor-Temperature and Humidity-Guangzhou Aosong Electronic Co. Disponible en: <http://www.aosong.com/en/products-32.html>
- BEETSMA, J.; 1994. The Varroa mite, a Devastating Parasite of Western Honeybees and an Economic Threat to Beekeeping, *Outlook Agric.* 23(3) 169–175
- BERNAL, J. L.; JIMÉNEZ, J. J., DEL NOZAL, M. J., TORIBIO, L., MARTÍN, M. T.; 2005. Physico-chemical parameters for the characterization of pure beeswax and detection of adulterations. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 107(3) 158–166
- BOSCH SENSORTEC; 2023. Pressure Sensor BMP280. Disponible en: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/bmp280/>
- BOURLIÈRE, F.; CHAUVIN, R; 1968. Traité de biologie de l'abeille. Societe Nationale de Protection de la Nature et d' Aclimation de France. 361. Paris
- BRICORK; 2023. Rollos de corcho para múltiples usos. Disponible en: <https://bricork.com/corcho-aislante-y-multiusos/21-corcho-industrial-en-rollo-8423437051254.html>



CORBET, S. A., FUSSELL, M., AKE, R., FRASER, A., GUNSON, C., SAVAGE, A., SMITH, K.; 1993. Temperature and the pollinating activity of social bees. *Ecol. Entomol.* 18(1) 17–30

CRANE, E.; 1994. Beekeeping in the world of ancient rome. *Bee World.* 75(3) 118–134

CRANE, Eva.; 1999. The world history of beekeeping and honey hunting. Routledge. 682. New York

CUNNINGHAM, M. M.; TRAN, L.; MCKEE, C. G.; ORTEGA POLO, R.; NEWMAN, T.; LANSING, L.; GRIFFITHS, J. S.; BILODEAU, G. J.; ROTT, M.; MARTA GUARNA, M.; 2022. Honey bees as biomonitors of environmental contaminants, pathogens, and climate change. *Ecol. Indic.* 134 108457

DE MENDIBURU, F.; 2023. agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. *R package version 1.3-7.* Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=agricolae>

DUPLEIX, A.; JULIEN, D.; MOITY-MAIZI, P.; SCHATZ, B.; 2020. Practices and knowledge of beekeepers and beehive suppliers regarding the wood material in the South of France. *J. Rural Stud.* 77 11–20

EL FADLI, K. I.; CERVENY, R. S.; BURT, C. C.; EDEN, P.; PARKER, D.; BRUNET, M.; PETERSON, T. C.; MORDACCHINI, G.; PELINO, V.; BESSEMOULIN, P.; STELLA, J. L.; DRIQUECH, F.; ABDEL WAHAB, M. M.; PACE, M. B.; 2013. World Meteorological Organization Assessment of the Purported World Record 58°C Temperature Extreme at El Azizia, Libya (13 September 1922). *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94(2) 199–204

ERDOĞAN, Y.; 2019. Comparison of colony performances of honeybee (*Apis Mellifera* L.) housed in hives made of different materials. *Ital. J. Anim. Sci.* 18(1) 934–940

ERICKSON, M. M.; SALWEI, M. L.; 2020. Comparison of Plastic Apimaye Hive with Wooden Langstroth Hive for Improved Winterizing Efficiency and Mite Control. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11299/217262>

FERRARI, S.; SILVA, M.; GUARINO, M.; BERCKMANS, D.; 2008. Monitoring of swarming sounds in bee hives for early detection of the swarming period. *Comput. Electron. Agric.* 64(1) 72–77.

FLORES, J. M.; GIL-LEBRERO, S.; GÁMIZ, V.; RODRÍGUEZ, M. I.; ORTIZ, M. A.; QUILES, F. J.; 2019. Effect of the climate change on honey bee colonies in a temperate Mediterranean zone assessed through remote hive weight monitoring system in conjunction with exhaustive colonies assessment. *Sci. Total Environ.*, 653 1111–1119.

FLORES, J. M.; RUIZ, J. A.; RUZ, J. M.; PUERTA, F.; BUSTOS, M., PADILLA, F.; CAMPANO, F.; 1996. Effect of temperature and humidity of sealed brood on chalkbrood development under controlled conditions. *Apidologie* 27(4) 185–192

FLORIS, I.; PUSCEDDU, M.; RACCIMOLO, E.; CASULA, A.; PATERI, G.; SATTA, A.; 2020. The use of cork in the thermoregulation of the hive: An innovation attempt to enhance non-wood products and beekeeping in Mediterranean forests. *Ann. Silv. Res.* 45(1) 99–104

FREE, J. B.; 1980. A organização social das abelhas (*Apis*). EPU/EDUSP. 79. São Paulo.

FUENTES-PÉREZ, J. F.; GARCÍA-VEGA, A.; BRAVO-CÓRDOBA, F. J.; SANZ-RONDA, F.



- J.; 2021. A Step to Smart Fishways: An Autonomous Obstruction Detection System Using Hydraulic Modeling and Sensor Networks. *Sensors* 1(20) 6909
- HIMMER, A.; 1927. Ein Beitrag zur Kenntnis des Wärmehaushalts im Nestbau sozialer Hautflügler. *Z. Vergl. Physiol.* 5(2) 375–389
- HOBSON JR, J. V.; 1983. Ferrocement as a Material for Hives. *Bee World* 64(3) 113–116
- JARIMI, H.; TAPIA-BRITO, E.; RIFF, S.; 2020. A review on thermoregulation techniques in honey bees' (*Apis mellifera*) beehive microclimate and its similarities to the heating and cooling management in buildings. *Futur. Cities Environ.* 6(1) 1–8
- KABIR, M. S.; YOLA, I. A.; 2020. Thermo-physical properties of beeswax. *FUDMA J. Sci.* 4(1) 460 - 465
- KLEIN, A. M.; VAISSIÈRE, B. E.; CANE, J. H.; STEFFAN-DEWENTER, I.; CUNNINGHAM, S. A.; KREMEN, C.; & TSCHARNTKE, T.; 2006. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 274(1608) 303–313
- KNAUF INSULATION; 2023. Lana mineral de vidrio - Naturoll 032. Disponible en: [https://knauf.com/es-ES/p/producto/naturoll-032-22945\\_4220](https://knauf.com/es-ES/p/producto/naturoll-032-22945_4220)
- KRAUS, B.; VELTHUIS, H. H. W.; & TINGEK, S.; 1998. Temperature profiles of the brood nests of *Apis cerana* and *Apis mellifera* colonies and their relation to varroosis. *J. Apic. Res.* 37(3) 175–181
- KUMAR GUPTA, R.; REYBRECK, W.; VAN VEEN, J. W.; GUPTA, A.; 2014. Beekeeping for poverty alleviation and livelihood security. Springer. 665. Dordrecht.
- LAUTENBACH, S.; SEPPELT, R.; LIEBSCHER, J.; DORMANN, C. F.; 2012. Spatial and Temporal Trends of Global Pollination Benefit. *PLOS ONE* 7(4) e35954.
- LE CONTE, Y., NAVAJAS, M. (2008). Climate change: Impact on honey bee populations and diseases. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* 27(2), 485–510.
- LEPKOVA, T.; LAKOV, L.; ALEKSANDROVA, M.; 2022. Studing the temperature microclimate in beehives made out of defferent materials. *Innovations* 10(2) 91–92
- LEZA, M.; HERRERA, C.; MARQUES, A.; ROCA, P.; SASTRE-SERRA, J.; PONS, D. G.; 2019. The impact of the invasive species *Vespa velutina* on honeybees: A new approach based on oxidative stress. *Sci. Total Environ.* 689 709–715.
- LINDAUER, M.; 1971. Communication Among Social Bees. Harvard University Press. 161. Cambridge.
- LORENZON, M. C. A.; CIDREIRA, R. G.; RODRIGUES, E. H. V.; DORNELLES, M. S.; PEREIRA, G.; 2004. Langstroth hive construction with cement-vermiculite. *Sci. Agric.* 61(6) 573–578
- MOUNTFORD-MCAULEY, R.; PRIOR, J.; CLAVIJO MCCORMICK, A.; 2023. Factors affecting propolis production. *J. Apic. Res.* 62(1) 162–170
- MYCIRCUITS; 2023. Code to use in MC Sentinel board. Disponible en: <https://github.com/MyCircuitsTV/Sentinel>
- NEVES, J. O.; 2002. Efeito de colméias construídas em argamassa de cimento-vermiculita sobre o desempenho de abelhas africanizadas (*Apis mellifera* Linnaeus, 1758), na fase de estiramento. *Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Zootecnia), UFRRJ, Rio de Janeiro.*



PETANIDOU, T.; KALLIMANIS, A. S.; TZANOPOULOS, J.; SGARDELIS, S. P.; PANTIS, J. D.; 2008. Long-term observation of a pollination network: fluctuation in species and interactions, relative invariance of network structure and implications for estimates of specialization. *Ecol. Lett.* 11(6) 564–575

PFEIFFER, K. J.; CRAILSHEIM, K.; 1998. Drifting of honeybees. *Insectes Soc.* 45(2) 151–167

R CORE TEAM; 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. *R Foundation for Statistical Computing*.

RIBEIRO-PEREIRA, G. C. O.; BARCHUK, A. R.; DO VALLE TEIXEIRA, I. R.; 2009. Environmental factors influencing propolis production by the honey bee *Apis mellifera* in Minas Gerais State, Brazil. *J. Apic. Res.* 48(3) 176–180

RICKE, D. F.; LIN, C. H.; JOHNSON, R. M.; 2021. Pollen Treated with a Combination of Agrochemicals Commonly Applied During Almond Bloom Reduces the Emergence Rate and Longevity of Honey Bee (Hymenoptera: Apidae) Queens. *J. Insect Sci.* 21(6)

ROSENKRANZ, P.; AUMEIER, P.; ZIEGELMANN, B.; 2010. Biology and control of Varroa destructor. *J. Invertebr. Pathol.* 103 Suppl 1

RUBIANO-NAVARRETE, A. F.; LESMES FABIAN, C.; TORRES-PÉREZ, Y.; GÓMEZ-PACHÓN, E. Y.; 2022. Durability Evaluation of New Composite Materials for the Construction of Beehives, *Sustainability* 14(22) 14683

SADIA, F. T.; HOSSAIN, M. S.; BEGUM, R.; SUJAN, M. H. K.; 2021. Comparative profitability analysis and resource use efficiency of beekeeping using wooden and poly hive in some selected areas of Bangladesh. *Int. J. Agric. Res. Innov. Technol.* 11(1) 84–91

SEELEY, T.; HEINRICH, B.; 1981. Regulation of temperature in the nests of social insects, 159-234. In Heinrich B (ed) *Insect thermoregulation*. New York, Wiley-Interscience Publication, 328.

SENSIRION; 202). SHT31-DIS-F±2% Digital humidity and temperature sensor with filter membrane. Disponible en: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT31-DIS-F>

SIDDIQUI, S. A.; SINGH, S.; BAHMID, N. A.; SHYU, D. J. H.; DOMÍNGUEZ, R.; LORENZO, J. M.; PEREIRA, J. A. M.; CÂMARA, J. S.; 2023. Polystyrene microplastic particles in the food chain: Characteristics and toxicity - A review. *Sci. Total Environ.* 892 164531

STABENTHEINER, A.; PRESSL, H.; PAPST, T.; HRASSNIGG, N.; CRAILSHEIM, K.; 2003. Endothermic heat production in honeybee winter clusters. *J. Exp. Biol.* 206(2) 353–358

SZABO, T. I.; 1980. Effect of Weather Factors on Honeybee Flight Activity and Colony Weight Gain. *J. Apic. Res.* 19(3) 164–171

UNIÓN EUROPEA; 2018. Regulation - 2018/848 - EN - EUR-Lex. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj>

VON FRISCH, K.; 1971. Bees: their vision, chemical senses, and language. Cornell University Press. 157. Nueva York.

ZERO6; 2023. Aislamiento - Corcho Negro Natural. Disponible en: <https://www.zero6.es/tienda/productos/aislamientos/corcho-negro/corcho-negro/>