



**Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, A.C.**

**TERMORREGULACIÓN EN COLMENAS DE *Apis mellifera*
BAJO TEMPERATURAS EXTREMAS**

Por:

SAMANTHA RODRÍGUEZ VÁSQUEZ

TESIS APROBADA POR LA

COORDINACIÓN DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD Y APROVECHAMIENTO DE
LOS RECURSOS NATURALES

Como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

APROBACIÓN Y FIRMAS

Los miembros del comité designado para la revisión de la tesis de Samantha Rodríguez Vásquez, la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Maestra en Ciencias

Dr. Alfonso Antero Gardea Béjar
Director de Tesis

Dra. Jaqueline García Hernández
Integrante del comité de tesis

M.C. Alejandro Romo Chacón
Integrante del comité de tesis

M.C. Jesús Antonio Orozco
Integrante del comité de tesis

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL

La información generada en la tesis "Termorregulación en Colmenas de *Apis mellifera* Bajo Temperaturas Extremas" es propiedad intelectual del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD). Se permiten y agradecen las citas breves del material contenido en esta tesis sin permiso especial de la autora Samantha Rodríguez Vásquez, siempre y cuando se dé crédito correspondiente. Para la reproducción parcial o total de la tesis con fines académicos, se deberá contar con la autorización escrita de quien ocupe la titularidad de la Dirección General del CIAD.

La publicación en comunicaciones científicas o de divulgación popular de los datos contenidos en esta tesis, deberá dar los créditos al CIAD, previa autorización escrita del director(a) de tesis.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN
ALIMENTACIÓN Y DESARROLLO, A.C.
Coordinación de Programas Académicos

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Graciela Caire Juvera", is written over a horizontal line.

Dra. Graciela Caire Juvera
Directora General

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso agradecimiento al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Asimismo, agradezco al posgrado de Maestría en Ciencias del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD, A.C.), por brindarme la oportunidad de cursar y obtener el grado que sustenta este logro, bajo su plan de estudios y sistema de enseñanza.

Quiero reconocer a mis formadores, a cada uno de manera muy especial, por sus valiosos aportes, ayuda y dedicación. Al Dr. Alfonso Gardea, agradezco profundamente por introducirme al fascinante mundo de la apicultura, por su apoyo incondicional y paciencia a lo largo del posgrado, así como por sus enseñanzas de todo tipo. También, agradezco a los integrantes de mi comité de tesis, al M.C. Alejandro Romo por su apoyo en la evaluación de bajas temperaturas extremas, al Dr. Humberto Gonzáles por su disposición en el área de estadística, y a la Dra. Jaqueline García y al M.C. Antonio Orozco por su valiosa retroalimentación para alcanzar los objetivos de la investigación.

También agradezco al Ing. Paulo Lagarda Campoy por su apoyo y enseñanza en la práctica de la apicultura y al Lic. Miguel Jiménez Llamas por permitirnos el uso del rancho donde se encuentra el apiario.

Un agradecimiento especial se dirige a mis compañeros de generación, en particular a mis amigas Melisa, María José y Anahí, quienes compartieron este camino conmigo, haciendo que el proceso se volviera más llevadero gracias a su compañía. A mi mejor amiga Camila, por su constante apoyo y ánimo, siempre haciéndome sentir cerca, a pesar de la distancia que nos separa.

Agradezco profundamente a mis padres, hermanos y abuelitos, quienes son el pilar de mi vida. Su constante apoyo, motivación y palabras sabias han sido fundamentales para impulsarme a seguir adelante y mejorar como persona. Por último, dedico un agradecimiento especial a mi novio Gil,

quien fue el motor que me impulsó a iniciar esta maestría, siempre alentándome e incluso creyendo en mí más de lo que yo misma a veces lo hacía. Gracias por todo.

DEDICATORIA

A mi madre por su amor y soporte incondicional.

CONTENIDO

DECLARACIÓN INSTITUCIONAL	3
AGRADECIMIENTOS	4
DEDICATORIA	6
CONTENIDO	7
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE CUADROS	11
RESUMEN	12
ABSTRACT	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. ANTECEDENTES	17
2.1. Microclima en la Colmena de <i>Apis mellifera</i>	17
2.1.1. Temperatura y Humedad Relativa.....	17
2.2. Termorregulación Social.....	18
2.2.1. Mecanismos de Termorregulación Pasivos.....	18
2.2.2. Mecanismos de Termorregulación Activos.....	19
2.3. Condiciones Microclimáticas Desfavorables.....	22
2.3.1. Alteraciones Fisiológicas, Morfológicas y de Comportamiento.....	22
2.4. La Apicultura en México.....	23
2.4.1. Importancia de la Apicultura en México.....	23
2.4.2. Impacto del Cambio Climático en la Apicultura.....	24
2.5. Una Solución para Incrementar la Eficiencia en la Termorregulación de Colmenas.....	25
2.5.1. Diseño de Colmenas para Condiciones Climáticas Específicas.....	25
2.5.1.1. Diseño de colmenas: bajas temperaturas.....	26
2.5.1.2. Diseño de colmenas: altas temperaturas.....	28
2.6. Perspectivas y Diseño de Componentes para Colmenas en Temperaturas Extremas.....	30
3. HIPÓTESIS	32
4. OBJETIVOS	33
4.1. Objetivo General.....	33
4.2. Objetivos Específicos.....	33
5. MATERIALES Y MÉTODOS	34
5.1. Área de Estudio.....	34
5.1.1. Evaluación Altas Temperaturas: Desierto Sonorense.....	34
5.1.2. Evaluación Bajas Temperaturas: Altiplano Chihuahuense.....	34
5.2. Metodología.....	35
5.2.1. Genotipo de <i>Apis Mellifera</i> Utilizado.....	35
5.2.2. Incorporación de Complementos en la Colmena.....	36

CONTENIDO (continuación)

5.2.3. Monitoreo de Cinética de Temperatura y Humedad Relativa.....	39
5.2.4. Preparación de Colonias de <i>Apis mellifera</i>	41
5.2.4.1. Selección por conteo de bastidores cubiertos.....	42
5.2.5. Estimación de Fuerza de la Colonia: Método Liebefeld.....	43
5.2.5.1. Estimación de fuerza de la colonia: análisis de imágenes digitales.....	45
5.2.6. Evaluación del Comportamiento Defensivo.....	48
5.2.7. Análisis Estadístico.....	51
5.2.7.1 Evaluación de temperaturas cálidas.....	51
5.2.7.1.1. Cinética de temperatura y humedad relativa.....	51
5.2.7.1.2. Estimación de fuerza de la colonia.....	51
5.2.7.1.3. Comportamiento defensivo.....	51
5.2.7.2. Evaluación de Temperaturas Frías.....	52
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	53
6.1. Evaluación Bajo Condiciones Cálidas Extremas.....	53
6.1.1. Cinética de Temperatura y Humedad Relativa (HR).....	53
6.1.1.1. Evaluación de colmenas vacías.....	53
6.1.1.2. Evaluación de termorregulación con abejas.....	55
6.1.1.3. Verano 2022.....	55
6.1.1.4. Verano 2023.....	59
6.1.1.5. Veranos 2022 y 2023 combinados.....	61
6.1.2. Estimación de Fuerza de la Colonia: Método Liebefeld.....	68
6.1.3. Comportamiento Defensivo.....	71
6.2. Evaluación Bajo Condiciones Frías Extremas.....	73
6.2.1. Cinética de Temperatura y Humedad Relativa.....	73
7. CONCLUSIONES.....	78
8. RECOMENDACIONES.....	80
9. REFERENCIAS.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Abejas formando conglomerado invernal y termograma infrarrojo, se observa el gradiente de temperatura de mayor a menor conforme se presentan las últimas capas de abejas.....	20
2. Figura representativa de calor endotérmico y racimo invernal para aumentar la temperatura del nido de cría.....	21
3. El aire caliente expulsado de la colmena se intercambia con aire fresco del ambiente externo que entra pasivamente a la colmena debido al mecanismo de enfriamiento	21
4. Fotografía del sitio aproximado de en Hermosillo, Sonora y el sitio exacto del colmenar ‘El Abuelo’	35
5. Fotografía del sitio aproximado en Cuauhtémoc, Chihuahua y el sitio exacto del colmenar.....	35
6. Representación de las partes que integran una colmena Langstroth estándar.....	37
7. Parte superior de componente de aislamiento y del componente de ventilación.....	37
8. Registrador HOBO UX100 y posición en la cual se colocó sobre un bastidor en el centro del nido de cría.....	40
9. Tratamientos experimentales en la evaluación de verano sobre mesa de soporte.....	40
10. Tratamiento Testigo Comercial en evaluación de verano colocada en el suelo	41
11. Cámara de cría con un total de 6.2 bastidores cubiertos.....	43
12. Acetato cuadrulado (dm^2) para medición de fuerza de la colonia.....	45
13. Fotografía editada con regla en la parte superior para ajustar escala a la longitud del bastidor (42.5cm).....	45
14. Conteo de abejas con la herramienta ‘Multi-point’, cada cruz de color gris numera cada abeja.....	46
15. Fotografía con cuadrícula de 1dm^2 utilizando la herramienta ‘Grid’	47
16. Procedimiento del uso de ImageJ para realizar la estimación por dm^2 o conteo manual de abejas en un bastidor.....	47
17. Pelota cubierta con gamuza negra sometida a prueba de comportamiento defensivo.....	49
18. Pelota de goma envuelta en gamuza mostrando agujones después de ser sometida a la prueba de comportamiento defensivo.....	50
19. Contabilización de número de agujones para la prueba de comportamiento defensivo.....	50

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura	Página
20. Temperatura interna promedio en tratamientos sin población de abejas.....	54
21. Humedad Relativa interna promedio en tratamientos sin población de abejas	55
22. Cinética de temperaturas internas y ambiental en el verano de 2022.....	56
23. Temperaturas internas promedio de las colmenas experimentales en verano 2022.....	57
24. Variaciones en la humedad relativa en los periodos durante el verano 2022.....	58
25. Humedad relativa interna promedio de las colmenas experimentales en verano 2022...59	
26. Temperatura interna promedio de las colmenas experimentales en verano 2023.....	60
27. Humedad relativa interna promedio de las colmenas experimentales en verano 2023....	61
28. Evolución de los cambios en temperatura durante los períodos de evaluación por dos años consecutivos 2022 y 2023.....	62
29. Humedad relativa interna promedio de las colmenas experimentales en verano 2022 y 2023.....	63
30. Cinética de temperatura interna de los tratamientos en los veranos 2022 y 2023.....	64
31. Humedad relativa interna promedio de los tratamientos en los veranos 2022 y 2023....	64
32. Bastidor del tratamiento de ventilación + aislamiento con un área de cría de 7 dm ²	69
33. Bastidor del tratamiento de ventilación + aislamiento mostrando las celdas operculadas y almacenadas con 1050 mL de miel.....	71
34. Número de agujones promedio de los tratamientos en la prueba de comportamiento defensivo.....	72
35. Temperatura interna promedio de las colmenas experimentales en invierno.....	74
36. Cinética de temperatura interna de los tratamientos en temporada invernal.....	75
37. Humedad Relativa interna promedio de las colmenas experimentales en invierno.....	76
38. Cinética de humedad relativa interna de los tratamientos en temporada invernal.....	77

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Temperaturas de intolerancia crítica y letal de subespecies de <i>Apis mellifera</i> expuestas a altas temperaturas.....	18
2. Efecto de la temperatura y la exposición en la sobrevivencia de abejas melíferas.....	23
3. Representación de las unidades experimentales sometidas a los tratamientos en evaluación de altas temperaturas.....	39
4. Valores de referencia para cálculo de población adulta.....	44
5. Valores de referencia de medida (mm) de celdas de cría y miel.....	45
6. Formato de registro para estimación de fuerza de la colonia.....	48
7. Diferencial de reducción de temperatura interna en los tratamientos con colmenas vacías.....	53
8. Resultados obtenidos de la medición de estimación de fuerza de la colonia para las variables número de abejas adultas, área de cría y cantidad de miel almacenada en los distintos tratamientos.....	70

RESUMEN

Las abejas melíferas han desarrollado mecanismos de termorregulación que responden rápidamente a cualquier cambio en las condiciones microclimáticas de sus colonias, pero éstos no son eficientes por debajo de los 6°C y arriba de los 38°C. Las pérdidas de colonias ocurren mayormente durante meses muy fríos o calurosos. En el presente estudio se evaluó la habilidad de cuatro tipos de complementos para la colmena a) Testigo (TE), b) Ventilación (V), c) Aislamiento (A) y d) Ventilación + Aislamiento (V+A), para aumentar la eficiencia de los mecanismos de termorregulación bajo condiciones de alta temperatura (36.3±8.0°C). Se encontró que todos los tratamientos mostraron una tasa de reducción significativamente mayor que el testigo ($p < 0.05$). Además, los tratamientos fueron diferentes entre ellos ($p < 0.05$). TE presentó la tasa más baja de reducción de temperatura con 1.3%, A un 4.0%, V+A un 5.6% y V resultó el más efectivo con 7.6% de reducción. Respecto la humedad relativa (HR), fue similar entre tratamientos ($P > 0.05$), con una media de 44.1±21.9%, lo cual pudo deberse a una alta variabilidad de las condiciones ambientales que prevalecieron durante las temporadas experimentales. Aunque los valores de HR no fueron significativos, se pudo identificar que las colmenas A tuvieron los valores más altos de HR (59.6±9.5%), mientras que los valores más bajos se registraron en V+A con una media de 41.6±11.6%. A su vez los tratamientos V y V+A presentaron mayor fuerza en la colonia representado por un mayor número de obreras, área de cría y miel almacenada. La magnitud de las respuestas de defensa de todos los tratamientos, alcanzaron valores de tres a cuatro veces de los reportados y estuvieron fuertemente condicionados a las altas temperaturas prevalecientes. Por otro lado, se evaluó el efecto del uso de colmenas con aislamiento en condiciones de baja temperatura (4.7±5.7°C). Los resultados indicaron que la temperatura interna del tratamiento A fue mayor ($p < 0.05$) (19.0±6.5°C) en comparación con el grupo TE (16.7±7.4°C). La cinética de temperatura resultó menos estable en TE presentando picos más pronunciados a lo largo de la evaluación. La HR resultó mayor ($p < 0.05$) en TE con valores de 58.6±14.9%, mientras que A (45.2±10.4%) obtuvo condiciones similares al ambiente (45.3±10.4%). Con estos hallazgos se demostró que bajo condiciones de poblaciones de abejas similares y -putativamente termorregulaciones igualmente similares- los materiales utilizados son capaces de disminuir el estrés térmico en el interior de la colmena, mejorando la estabilidad microclimática y eficiencia de

los mecanismos de termorregulación.

Palabras clave: *Apis mellifera*, abejas melíferas, colmena modificada, termorregulación

ABSTRACT

Honey bees developed thermoregulating mechanisms, which respond quickly to any change in the microclimatic conditions of their hives, however these are not efficient below 6°C and above 38°C. Colony losses mostly occur during very cold or hot months. In the present study, the ability of four types of hive supplements was assessed to increase the efficiency of thermoregulation mechanisms under high temperatures (36.3±8.0°C): a) Control (T), b) Ventilation (V), c) Insulation (A), and d) Ventilation+Insulation (V+A). Treatments showed a highly significant average reduction rate than controls ($p=0.00$). T achieved a reduction rate of 1.3%, A 4.0%, V+A 5.6%, and V 7.6%. As far as relative humidity (RH) no significant changes were found, mostly because of the wide range of conditions prevailing along the study period, which averaged values around 44.1±21.9%. Nevertheless, it was possible to assess that T showed the highest values with 59.6±9.5%, followed by V with 52.5±11.3, V+A with 46.3±22.8, and A with 41.6±11.6%. Meanwhile, V and V+A hives exhibited greater colony strength, with a higher number of workers, breeding area, and stored honey. The defensive response magnitude in all treatments reached values three to four times as high as those reported elsewhere, showing that is strongly affected by the occurring high temperatures.

On the other hand, the effect of incorporating insulating panels on hives under low-temperature conditions (4.7±5.7°C) was evaluated as well. The results indicated that the internal temperature of the A hives was higher, at 19.0±6.5°C, compared to T hives at 16.7±7.42°C ($P>0.05$). Temperature kinetics were less stable in T, presenting more pronounced peaks throughout the evaluation; while RH was highest in T with 58.6±14.9% as compared with A at 45.2±10.4%, and ambient humidity at 45.3±10.4%. These findings demonstrated that under conditions of similar bee populations and putatively similar thermoregulation capacities, the materials used as supplements were capable of reducing thermal stress inside the hive, improving microclimatic stability, and enhancing the efficiency of thermoregulation mechanisms.

Keywords: *Apis mellifera*, honeybees, modified hive, thermoregulation

1. INTRODUCCIÓN

La abeja melífera (*Apis mellifera*) se considera el polinizador más valorado de los cultivos agrícolas económicamente importantes a nivel global. Sin embargo, se han experimentado graves pérdidas de colonias en los últimos años debido a factores que actúan en sinergia (Gray *et al.*, 2020). Las condiciones climáticas son un factor importante para el bienestar de la colmena, ya que las condiciones desfavorables o los cambios drásticos causan mortandad de las colonias. En la colmena la temperatura de la cámara de cría se controla estrictamente dentro de un rango de 33 a 35°C, mantener esta estrecha ventana es crucial para el buen desarrollo de las crías (Eouzan *et al.*, 2019). En consecuencia, si la temperatura sale de este rango afecta procesos fisiológicos, así como el comportamiento general de las abejas, por lo que es relevante mantener condiciones microclimáticas estables.

Actualmente las colmenas Langstroth convencionales son las más utilizadas en apicultura por su bajo costo de producción y fácil manipulación. Son construidas con madera blanda de distintas especies maderables, con un grosor de ~23 mm (Langstroth, 1852). Este tipo de diseño brinda un deficiente factor de aislamiento para la colmena, lo que afecta la labor de termorregulación y control de humedad en el nido de cría por las abejas (Mitchell, 2015). Ocasionalmente que en localidades con estaciones predominantes de temperaturas extremas que hacen uso de esta colmena, ocurra disminución de colonias, muerte o desaparición incomprensible de abejas.

Aunque para los apicultores es común sufrir disminución en las colmenas en invierno, en los últimos años se ha presentado aumento de pérdidas en verano, lo que ocasionó las mayores pérdidas anuales reportadas en el 2021. En la temporada 2020-2021, Steinhauer y colaboradores (2021) monitorearon las pérdidas de colonias de abejas en E.U.A. y alcanzaron aproximadamente un 32.2% en invierno y aproximadamente un 31.1% en verano, obteniendo un total de 63.3% de pérdidas. Existen numerosas amenazas que afectan a las abejas y la evidencia indica que el uso de plaguicidas, enfermedades/plagas y las temperaturas ambientales extremas son los principales factores que ocasionan las pérdidas de colonias (Alattal *et al.*, 2015).

La colonia de abejas realiza mecanismos de termorregulación por los cuales los cambios de temperatura inducidos por el medio ambiente se compensan dentro de la colonia, mediante la producción de calor endotérmico y evaporación de agua por abanicado de alas para calentar y

enfriar la cámara de cría (Heinrich, 1980; Jarimi *et al.*, 2020). Sin embargo, éstos no son lo suficientemente eficientes cuando se trata de temperaturas extremas para las abejas, ya sea en condiciones cálidas mayores de 38°C o frías menores de 6°C. Debido a que dichos mecanismos causan gastos excesivos de energía cuando las temperaturas son extremas causan de manera concomitante una alta mortandad de obreras, lo que por ende baja la productividad de la colmena (Li *et al.*, 2019).

Hay pocos estudios enfocados en la evaluación de distintos tipos de diseños en colmenas. Se ha demostrado que las capacidades térmicas de las colmenas convencionales Langstroth son pobres en contraste con los nidos naturales. En zonas con ocurrencia de temperaturas extremas los cambios en la estructura de la colmena, como paredes más gruesas y diseños de entradas apropiadas para reducir el estrés de las colonias, reducen las fluctuaciones de temperatura y humedad (Mitchell, 2019). Estudios previos han demostrado una mayor eficiencia de termorregulación en colmenas modificadas tanto para climas cálidos como fríos (Abou-Shaara *et al.*, 2013; Alburaki *et al.*, 2021; Erdoğan, 2019; Floris *et al.*, 2020), mejorando así el rendimiento general de las colonias y disminuyendo la tasa de mortandad en verano e invierno.

Las colmenas Langstroth convencionales han prevalecido por mucho tiempo y el explorar distintos tipos de materiales para la colmena dependiendo del clima predominante podría mejorar las condiciones microclimáticas para las abejas (Mitchell, 2019). De esta manera, brindaría una disminución en las pérdidas de colonias y mejoraría la productividad en zonas con climas extremos. Existen complementos tecnológicos y de comunicación (apicultura de precisión) que se utilizan para regular al óptimo las condiciones internas mediante sistemas de enfriamiento y calefacción, sin embargo, no suelen ser rentables para la mayoría de los apicultores (Cousin *et al.*, 2019). Además, para el manejo de estos equipos se requiere de conocimientos técnicos muy específicos y servicios de mantenimiento continuos. Es por esto, que surge la necesidad de diseñar colmenas rentables y eficientes para disminuir el estrés térmico. Con base en lo expuesto, se planteó la premisa de que el añadir complementos de ventilación y de aislamiento a las colmenas mejorarían la eficacia de los mecanismos de termorregulación de las abejas cuando están sometidas a climas extremos.

2. ANTECEDENTES

2.1. Microclima en la Colmena de *Apis mellifera*

2.1.1. Temperatura y Humedad Relativa

Los insectos son organismos poiquiloterms, es decir, no tienen capacidad de regular su temperatura interna. Sus funciones biológicas se ven afectadas por factores abióticos como lo son la temperatura y la humedad. Las abejas melíferas deben mantener una temperatura entre 33 y 35°C en la colmena, en el nido de cría se debe de mantener un rango más estrecho y sin oscilaciones bruscas, específicamente de $34.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ (Stabentheiner *et al.*, 2010). Las larvas y pupas son organismos estenoterms, por lo que solo soportan pequeñas variaciones en temperatura (Stabentheiner *et al.*, 2010). Por otro lado, la humedad es una importante variable microclimática, ya que es vital para la eclosión exitosa de los huevecillos. La humedad relativa óptima es de un 65% para una eclosión con una supervivencia del 90 a 95% de las crías (Ellis *et al.*, 2008).

El funcionamiento de la colonia se fundamenta en la división de labores como: alimentar a las crías, recolectar alimento, construir panales, defensa ante intrusos y realizar labores de higiene, entre otras. Las labores las realizan las obreras y se asignan de acuerdo con el polietismo temporal, el cual se ve influido por la etapa de vida del individuo. Una actividad de gran importancia en la colonia es la regulación de la temperatura, ésta se realiza a través de una serie de mecanismos, los cuales son seleccionados de acuerdo con las necesidades de las crías. En temperaturas frías entre -2 y $+6^\circ\text{C}$ las abejas melíferas no llegan a realizar un mecanismo eficiente, por lo que mueren en menos de una hora; entre 9 y 12°C pueden sobrevivir durante varias horas, siempre y cuando alcancen una buena termorregulación, lo que dependerá de la abundancia de obreras, los recursos disponibles y su capacidad de termorregulación (Jarimi *et al.*, 2020).

En condiciones de temperaturas altas las melíferas tienen una mayor resistencia, el rango máximo de tolerancia al calor reportado es de 54°C en la variante *Apis m. mellifera* (Li *et al.*, 2019). El rango de supervivencia para las abejas en temperaturas bajas o altas varía dependiendo de la

subespecie, como se muestra en el Cuadro 1, debido a su adaptación a diferentes climas (Abou-Shaara *et al.*, 2017). La capacidad de las subespecies tolerantes se explica por la presencia de proteínas de choque térmico que tienen la función de reducir el estrés oxidativo (Li *et al.*, 2019). Además, las diferencias en la tolerancia térmica se atribuyen a las diferencias en tamaño corporal y abundancia de setas (pelos), lo que influye en la eficiencia de la termorregulación (Li *et al.*, 2019). Por lo que es importante el considerar la subespecie adecuada para las explotaciones apícolas, dependiendo de las condiciones climáticas imperantes en la zona de interés.

Cuadro 1. Temperaturas de intolerancias crítica y letal de subespecies de *Apis mellifera* expuestas a altas temperaturas. Adaptado de: Abou-Shaara *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019.

Subespecie de <i>Apis mellifera</i>	Intolerancia Crítica (°C)	Temperatura Letal (°C)
<i>A. m. mellifera</i>	54	60
<i>A. m. dorsata</i>	38	45
<i>A. m. carnica</i>	61	66
<i>A. m. jemenitica</i>	66	68
<i>A. m. cerana</i>	57	60

2.2. Termorregulación Social

2.2.1. Mecanismos de Termorregulación Pasivos

La colonia de abejas melíferas silvestre frecuentemente es sedentaria, por ende, suele presentar desafíos respecto la variabilidad de las condiciones climáticas ambientales en la región en que se encuentra. Como respuesta a estos desafíos han desarrollado mecanismos colectivos para dar solución al estrés térmico. Esta regulación de la temperatura en la colmena puede darse de forma pasiva o activa. La termorregulación pasiva se basa principalmente en la ubicación del nido de cría dentro de la colmena, la orientación del nido y la arquitectura o materiales de construcción (Jones y Oldroyd, 2006), esto cuando las abejas se encuentran en condiciones silvestres.

Para reducir los cambios fluctuantes en la colonia, las abejas aíslan el interior de una forma circundante para reducir cualquier entrada o salida de calor por alguna cavidad, así como el evitar

un flujo de aire indeseado (Jarimi *et al.*, 2020). Utilizan el propóleo que obtienen de la savia y resinas de algunas plantas, el cual actúa como una especie de barniz o pegamento para el sellado de la colmena. También tiene como propósito evitar la entrada de invasores y un efecto en la sanidad por las propiedades antimicrobianas de las resinas. Los mecanismos pasivos funcionan como amortiguadores de la temperatura entre el medio ambiente y el interior de la colmena, facilitando la regulación de temperatura activa (Jones y Olroyd, 2006).

2.2.2. Mecanismos de Termorregulación Activos

Las fluctuaciones de la temperatura también son influenciadas por los cambios en la densidad de individuos que entran y salen de la colmena. En climas con una temperatura menor a 15°C las abejas realizan el mecanismo de aislamiento térmico y calefacción térmica (Stabentheiner *et al.*, 2003). Este consiste en la agrupación de conglomerados compactos donde las abejas se forman en estratos orientadas hacia el interior para tener un efecto en la reducción del volumen de aire cerca del nido de cría (Figura 1). Las abejas que se encuentran en la capa más externa del enjambre conectan sus patas para formar una especie de barrera, obstaculizando la disipación del calor hacia el exterior. Como consecuencia, la formación de conglomerados reduce la superficie de los cuerpos de abejas, minimizando así la pérdida de calor por convección (Figura 2) (Jones y Oldroyd, 2006; Stabentheiner *et al.*, 2003, 2010).

El mecanismo de aislamiento térmico se eficienta con la producción de calor metabólico, el cual realizan las abejas posicionadas en el núcleo del conglomerado (Stabentheiner *et al.*, 2003). Esta generación calórica se produce con movimientos involuntarios rápidos de contracción y liberación de los músculos torácicos de las obreras (escalofríos), el cual es un trabajo muy agotante, ya que requieren una alta cantidad de energía. Cuando las temperaturas son muy bajas y el mecanismo no es eficiente, la colmena presenta una disminución de población por mortandad causada por el gasto individual excesivo de energía (Stabentheiner *et al.*, 2003).

En temperaturas cálidas el nido está expuesto al sobrecalentamiento, para contrarrestarlo las abejas emplean mecanismos de enfriamiento. A pesar de esto, en condiciones de temperaturas altas durante el día es poco probable que el sobrecalentamiento ocurra porque gran cantidad de obreras se encuentra fuera de la colmena en busca de alimento. Por la noche, si la colmena presenta un

exceso de calor, las abejas instintivamente se quedan fuera. Estos comportamientos funcionan para mantener más fresca la colmena, siempre y cuando las temperaturas no sean extremas (Zeaiter y Myerscough, 2020). A medida que la temperatura aumenta, las abejas realizan abaniquos con sus alas colocándose en zonas estratégicas para favorecer un flujo continuo de entrada y salida del aire en la colmena, causando la salida del aire viciado y caliente del interior y permitiendo la entrada de aire fresco del exterior, el cual entrará pasivamente por la piquera (Peters *et al.*, 2019).

El enfriamiento evaporativo es otro método de enfriamiento que llevan a cabo las abejas melíferas. Para realizar este mecanismo un grupo de abejas ‘aguadoras’ recolectan agua y la llevan a la colmena (Figura 3), luego la depositan en zonas estratégicas y un grupo de obreras comenzará con el abanicado. Estos comportamientos en conjunto crean activamente aire fresco y húmedo que se esparce por la colmena logrando reducir la temperatura.

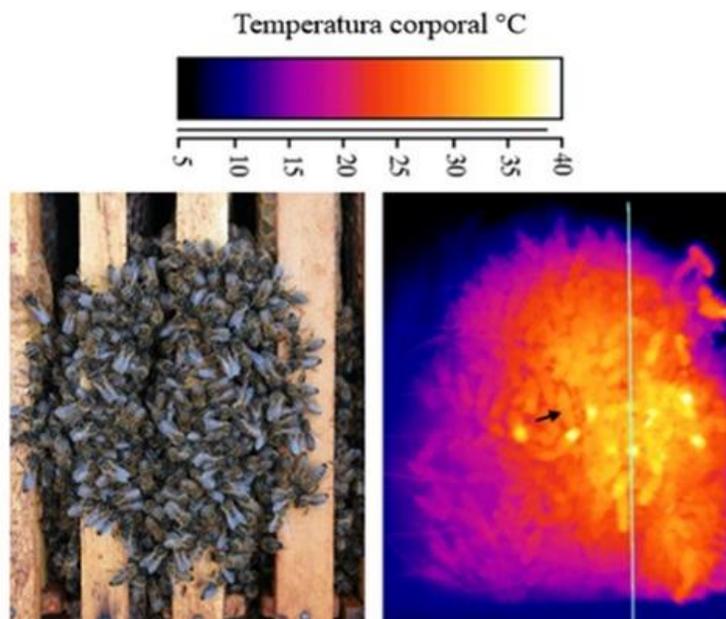


Figura 1. Abejas formando conglomerado invernal y termograma infrarrojo, se observa el gradiente de temperatura de mayor a menor conforme se presentan las últimas capas de abejas. La flecha apunta a la reina. Adaptada de: Stabentheiner *et al.* (2003).

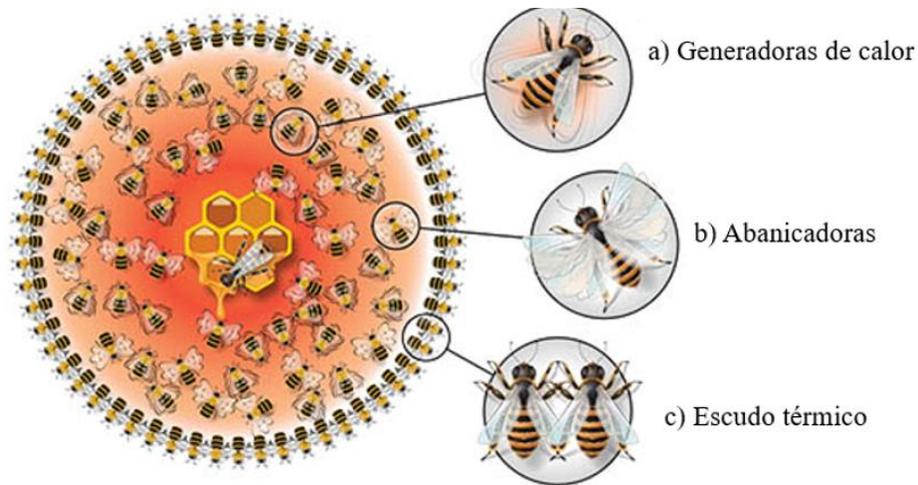


Figura 2. Figura representativa de calor endotérmico y racimo invernal para aumentar la temperatura del nido de cría. Adaptado de: Purdue Extension, Purdue University (2017).

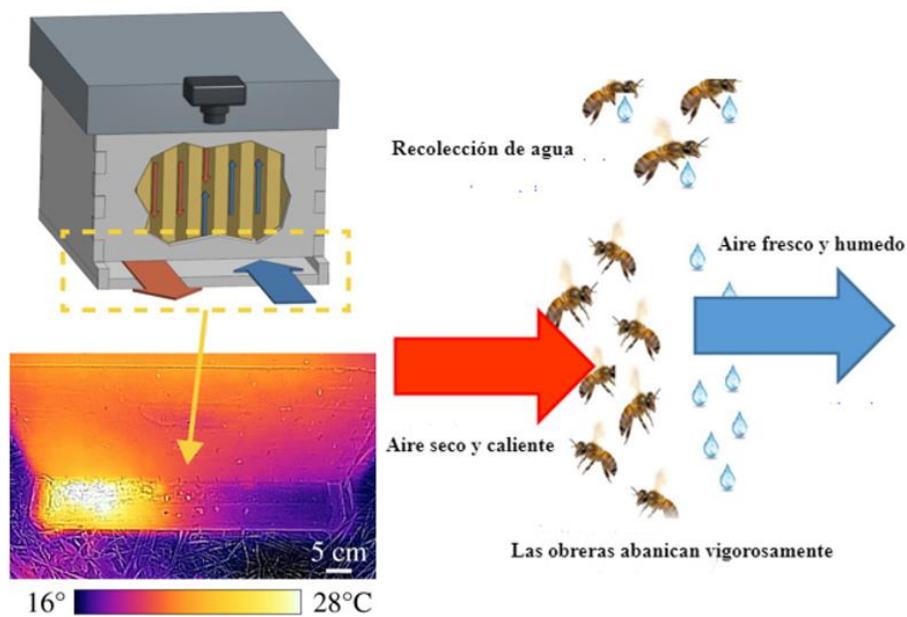


Figura 3. El aire caliente expulsado de la colmena se intercambia con aire fresco del ambiente externo que entra pasivamente a la colmena debido al mecanismo del enfriamiento. Adaptado de: Jarimi *et al.* (2020); Peters *et al.* (2019).

2.3. Condiciones Microclimáticas Desfavorables

2.3.1. Alteraciones Fisiológicas, Morfológicas y de Comportamiento

Las abejas melíferas han desarrollado adaptaciones hacia diversas condiciones climáticas por sus mecanismos de termorregulación y respuesta rápida a las condiciones microclimáticas de sus colonias, sin embargo, no siempre pueden mantener las condiciones óptimas requeridas. La temperatura tiene un efecto que repercute incluso en la sobrevivencia de las abejas melíferas, especialmente en temperaturas extremas (Cuadro 2). Por otro lado, incluso bajo temperaturas subóptimas, por debajo de 31 y arriba de 36°C, tienen diversos efectos negativos como malformaciones en abdomen y patas, así como alteraciones en el tamaño de la probóscide, la zona dorsal (tergum) y alas (Wang *et al.*, 2016).

Asimismo, la temperatura de crianza influye en el desarrollo cerebral de las abejas causando deficiencias neuronales, ya que pequeños cambios en la temperatura normalmente mantenida durante el desarrollo de las pupas de las abejas melíferas influyen en la maduración sináptica en el sistema nervioso en desarrollo (Groh *et al.*, 2004). Motivo por el cual afecta negativamente la memoria y orientación, los cuales son importantes para la colecta de alimento, ya que la capacidad de asociación de olores con alimento es parte fundamental del éxito de la búsqueda de néctar, al igual que para encontrar el regreso a la colmena (Monchanin *et al.*, 2019). Se ha demostrado que las abejas criadas a 35 y 36°C tienen una memoria y orientación más eficiente que las abejas criadas a 33°C (Groh *et al.*, 2004). Además, una exposición prolongada en estas temperaturas produce una disminución en la eficiencia del baile del meneo que tiene la función de comunicar las áreas potenciales de néctar y polen. La generación de ‘malas bailarinas’ en la colmena trae consigo abejas recolectoras con una baja probabilidad de comunicación eficiente, ya que una ausencia o una danza mal ejecutada no orientará a las abejas recolectoras (Tautz *et al.*, 2003).

La reina es la única hembra con capacidad reproductora en la colonia, al alcanzar cierta madurez ésta tiene un período de apareamiento con los zánganos. La reproducción sucede una o dos veces en su vida y a partir de esto almacenan la esperma adquirida en la espermateca hasta por 5 años (Preston *et al.*, 2019). Estudios previos han demostrado que temperaturas menores de 15°C y

mayores de 38°C causan un daño significativamente sobre la viabilidad de la esperma almacenada por la abeja reina (McAfee *et al.*, 2020; Preston *et al.*, 2019). A su vez, los zánganos presentan una disminución en la viabilidad de los espermatozoides con temperaturas mayores a 39°C (Stürup *et al.*, 2013). La viabilidad y abundancia del semen de los zánganos afecta directamente el rendimiento reproductivo de la reina en la ovipostura, lo que determina la productividad de la colonia. Además, cuando la reina está estresada afecta la calidad y cantidad de huevecillos de obreras (Stürup *et al.*, 2013).

El estrés térmico por frío disminuye la probabilidad de eclosión de los huevos y retrasa el desarrollo de las obreras, por lo que el bienestar de la reina tiene impactos en la salud individual y resiliencia en la colonia (McAfee *et al.*, 2020; Preston *et al.*, 2019). Evidentemente la temperatura es un factor que afecta diversos aspectos fisiológicos y de comportamiento a las abejas melíferas, los cuales afectan de manera significativa la productividad de la colonia, sin embargo, éstos solo son algunos ejemplos de repercusiones causadas por el estrés térmico.

Cuadro 2. Efecto de la temperatura y la exposición en la sobrevivencia de abejas melíferas. Adaptado de Southwick y Heldmaier (1987).

Temperatura (°C)	Efecto de la Temperatura
Entre 9 y 12	Las abejas melíferas pueden sobrevivir durante varias horas siempre que alcancen la temperatura ambiente.
Entre -2 y +6	Las abejas melíferas mueren en menos de una hora.
Temperatura del aire exterior de -25	Una colonia de <i>ca.</i> 17,500 abejas sobrevivieron durante más de 300 horas.
Temperatura del aire exterior de -28	Una colonia de abejas en un enjambre pudo mantener una temperatura central de 31 °C por un corto tiempo.

2.4. La Apicultura en México

2.4.1. Importancia de la Apicultura en México

La apicultura es la actividad dedicada a la crianza y cuidado de las abejas melíferas con el fin de coleccionar los productos derivados de la colmena y utilizar los servicios ecosistémicos que brindan.

Tiene una gran importancia económica, ecológica y agrícola, proporcionando la polinización, favoreciendo un incremento en los rendimientos de cultivos, incremento de alimentos de origen vegetal, materias textiles e insumos agropecuarios. En México la apicultura es de las principales actividades pecuarias, especialmente en regiones tropicales. Se ha practicado desde la introducción de las abejas europeas durante la Colonia, brindando empleos e ingresos, además, es de las principales actividades generadoras de divisas y de empleo para las familias rurales. En 2020 se contabilizó alrededor de 43 mil apicultores en todo el país, registrados en 508 asociaciones ganaderas especializadas en apicultura (Secretaría Agricultura y Desarrollo Rural, 2020). México se posiciona en el noveno lugar en producción de miel a nivel global y es el décimo tercer mayor exportador (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2021). En 2019 alcanzó un valor de 67.9 millones de dólares, esta cifra representó un aumento de 6.1% más de ganancia en comparación con los últimos 10 años, ya que desde 1990 el sector apícola había presentado una tendencia hacia la baja (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2020).

Sin embargo, las causas del declive del sector apícola siguen presentes debido a diversas causas sociales que incluyen pobreza, desigualdad, conflictos originados por el cambio y uso del suelo, económicos por restricciones de acceso a mercados con estándares exigentes y alta competitividad. Así como, factores ecológicos como lo son la africanización de las colonias, la varroasis, uso de agroquímicos sintéticos y efectos del cambio climático (olas de calor y huracanes, principalmente) (García *et al.*, 2020).

2.4.2. Impacto del Cambio Climático en la Apicultura

La actividad apícola depende fuertemente de rangos estables de condiciones climáticas para el buen desarrollo y productividad de las colonias de abejas. De forma directa afecta el principal beneficio que brindan las abejas más allá de la producción de miel, la polinización, éste es un servicio de gran importancia para la producción de alimentos. Indirectamente causa impactos en cuestiones socioeconómicas en el sector apícola, dado que el valor de la especie *Apis mellifera* se considera de mayor importancia en polinización de cultivos. En México la última estimación sobre el valor de polinización fue en el año 2008 con 63 mil millones de pesos (1,260,000 millones de dólares)

(Sosenski y Domínguez, 2018).

Con predicciones en modelos de simulación sobre el calentamiento global se señalan impactos en cuestiones de distribución, interacción, aumento de enfermedades, escasez de alimentos, de las especies polinizadoras incluyendo las abejas melíferas (Menzel y Feldmeyer, 2021). Actualmente los apicultores han tenido que adoptar nuevas prácticas apícolas y aumentar los gastos de inversión y manejo como resultado del cambio climático, esto resulta en una práctica menos rentable para los productores rurales, por lo que muchos han abandonado la actividad. En México, además, se debe tomar en cuenta que hay abejas africanizadas y son más susceptibles a las condiciones ambientales, respondiendo con la evasión. Esta hibridación se reporta desde el 30 hasta el 100% de las colmenas, dependiendo de si el apicultor realiza o no el cambio de reinas frecuentemente (Alaniz-Gutiérrez *et al.*, 2016). Se han aplicado encuestas a apicultores mexicanos sobre la pérdida de colmenas y la mayoría (56%) ha considerado los cambios climáticos como la causa principal de la pérdida en los últimos años (Medina-Flores *et al.*, 2018).

El desequilibrio de condiciones climáticas y desarrollo de la vegetación impacta de forma negativa el ámbito socioeconómico, obligando a cambios de estrategias de producción que elevan costos de inversión y producción afectando la rentabilidad de la actividad misma. La investigación de pesticidas ligada al colapso de colmenas ha sido estudiada por largo tiempo y finalmente ha surgido el enfoque a otras amenazas como lo son el cambio climático y su relación con invasiones biológicas y agravamiento de enfermedades (Decourtye *et al.*, 2019). Muchos estudios se enfocan en que el cambio climático pone en riesgo a las abejas, sin embargo, pocos se enfocan en alternativas para enfrentarse a ello.

2.5. Una Solución para Incrementar la Eficiencia en la Termorregulación de Colmenas

2.5.1. Diseño de Colmenas para Condiciones Climáticas Específicas

En la apicultura tradicional se utiliza la colmena Langstroth propuesta desde el año 1852 y fue fabricada masivamente a nivel global, significando un gran avance para la apicultura, este diseño

ha persistido hasta la actualidad por su precio accesible (Mitchell, 2019). La colmena es un componente muy importante en la apicultura, es el hogar de las abejas, y ellas la adoptan para modificarla de acuerdo a sus necesidades. Las abejas tienen mecanismos para regular la temperatura del nido, sin embargo, la eficiencia de éstos depende directamente de las condiciones climáticas. Se ha demostrado que, a pesar de su prevalencia, la colmena Langstroth no es la más adecuada para la crianza de las abejas en climas extremos (Cook *et al.*, 2021). El estrés de las abejas es por cuestiones sinérgicas y alguna de éstas son las fuertes oscilaciones climáticas, las invernadas y olas de calor se han vuelto más peligrosas (Clair *et al.*, 2022). Por lo que se ha dado la necesidad de desarrollar diseños de colmenas específicas para las condiciones climáticas dominantes, así como la subespecie de abejas que se produce.

2.5.1.1. Diseño de colmenas: Bajas temperaturas. Durante el invierno o en zonas con predominancia de temperaturas bajas es común presentar pérdidas de colonias. Debido a la baja disponibilidad de recursos florales, además, los recursos estacionales disponibles, además de escasos, suelen presentar una calidad baja de néctar. Las abejas no suelen realizar hibernaciones, durante la temporada de floración las abejas que habitan en zonas frías realizan esfuerzos máximos para acumular sus alimentos y prepararse para el invierno (Stabentheiner *et al.*, 2003; Steinhauer *et al.*, 2021). Durante esta temporada no hay reproducción para ahorrar recursos y éstos son consumidos por las obreras y la reina, mientras que los zánganos dejan de ser alimentados y mueren. Por estos motivos, hay una baja en la productividad de la colmena, el invierno para los apicultores es considerado el periodo de mayor riesgo para las colonias (Döke *et al.*, 2015).

La mortandad invernal de las colonias es de las principales causas de pérdidas de colonias en el mundo. Bee Informed Partnership realiza cada año en los EE.UU. monitoreos de pérdidas de colonias para la identificación de las causas y medidas respecto al manejo. En el invierno del 2020-2021 se estimó una pérdida del 32.2% (Steinhauer *et al.*, 2021) en las colonias gestionadas, esto representó un aumento en la tasa de pérdida invernal del año anterior (22.6%) considerándose la pérdida promedio invernal más alta que se ha tenido en los últimos 14 años (Steinhauer *et al.*, 2021). En México no hay estudios amplios sobre las pérdidas anuales, sin embargo, hay estudios aislados que han reportado una pérdida del 16.4% en la zona central que cuenta con climas templados subhúmedos (Brodschneider *et al.*, 2018; Gray *et al.*, 2020). El clima en México varía

mucho dependiendo de la región por lo que no se puede generalizar la pérdida.

Para hacer frente a las pérdidas bajo temperaturas extremas se han desarrollado tecnologías implementadas para el uso de colmenas termorreguladoras y también colmenas inteligentes, un cambio completo en las prácticas apícolas tradicionales. Se le denomina ‘Apicultura de Precisión’ (Zacepins *et al.*, 2015) se basa en el monitoreo de colmenas vía remota para eficientar los recursos y mejorar la productividad de las abejas. Consiste en una serie de sensores que indican el estado de la colmena, almacenando datos constantemente, a los cuales puede tener acceso el apicultor a través de su dispositivo móvil. Estas prácticas han mejorado significativamente la apicultura, ya que mantienen un control directo en las condiciones microclimáticas de la colonia y constantemente se monitorean diversas variables como lo son la sanidad, cantidad de abejas, humedad, entre otros. A pesar de ser una alternativa bastante eficiente para afrontar las condiciones climáticas extremas, suelen ser equipos muy costosos (IEEE Control Systems Society. Chapter atención Malaysia & Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019) que necesitan de técnicas específicas, por lo que podría afectar en las cuestiones de rentabilidad en la práctica. Otras alternativas apícolas económicamente viables son el diseño de componentes que permitan a la colmena Langstroth mejorar la eficiencia termorreguladora de las colonias dependiendo del tipo de clima, esta alternativa es de menor costo, ya que se requieren cambios muy simples en la estructura o material, trayendo consigo buenos resultados (Mitchell, 2019). En condiciones invernales es de gran importancia el aislamiento de colmenas con materiales protectores para ralentizar la pérdida del calor generado por la colonia. Existen pocos estudios recientes basados en la evaluación de la eficiencia de termorregulación en colmenas modificadas, sin embargo, a continuación, se discuten algunas de ellos.

Alburaki y Corona (2021) demostraron que las colmenas forradas con poliuretano proveen un mejor aislamiento en la temporada invernal, manteniendo la temperatura y humedad con oscilaciones menores. La temperatura en el nido de cría en las colmenas de poliuretano fue en promedio $2.6 \pm 0.05^\circ\text{C}$ mayor a la colmena de madera, el estudio se llevó a cabo en temperaturas promedio de 0°C , bajo esta temperatura es costoso lograr una eficiencia de termorregulación, sin embargo, bajo cualquier condición climática, el uso de aislamiento extra ayuda a las abejas a mejorar las condiciones de temperatura y humedad. La humedad en las cámaras con refuerzo de poliuretano fue un 10% mayor en comparación a las de madera (52.05% y 62.50%) esto quizá se debió a la capacidad de absorción de humedad que caracteriza a la madera, además se obtuvieron

mayores porcentajes de humedad relativa durante el día, comparando con la noche. La disminución de humedad en la colmena mostró resultados benéficos con el poliuretano, ya que en invierno generalmente hay una elevación constante interna en las colmenas de madera, lo que propicia un ambiente óptimo para la proliferación de enfermedades.

Por otra parte Clair y colaboradores (2022) evaluaron los beneficios de aislar las tapas de colmenas Langstroth en un ambiente templado con láminas de poliestireno. Obtuvieron temperaturas más altas en los conglomerados de abejas con tapa aislada, comparando con la ausencia de aislamiento, a pesar de que no encontraron diferencias significativas en las temperaturas promedio de la colmena, sí disminuyó significativamente el consumo de las reservas alimenticias, lo que mejoró la supervivencia invernal. Por otro lado, Floris y colaboradores (2020) evaluaron la eficiencia de termorregulación en colmenas de corcho. Se sabe que el corcho tiene mejores propiedades aislantes que la madera y los resultados obtenidos lo demostraron. Se encontraron valores significativos en la temperatura, las colmenas de corcho obtuvieron temperaturas promedio de $34.7 \pm 0.3^{\circ}\text{C}$ y las de madera $31.5 \pm 2.2^{\circ}\text{C}$, mientras que la temperatura promedio ambiental fue de 25°C , por lo que no se presentaron temperaturas tan estresantes, sin embargo, las colmenas de corcho mantuvieron las temperaturas óptimas por períodos más largos.

Estos estudios mostraron alternativas para la modificación de colmenas para climas fríos especialmente en zonas templadas, sin embargo, no se especifica la subespecie utilizada en los estudios, lo que influye sobre las capacidades de regulación de temperatura. Los materiales como el poliestireno y la madera de corcho muestran menor conductividad térmica en comparación con las colmenas convencionales de madera. La construcción de colmenas modificadas sugiere que la combinación de materiales podría brindar una mejora al estar actuando en sinergia las propiedades de diversos materiales (Floris *et al.*, 2020a; Wolfslehner *et al.*, 2019).

2.5.1.2. Diseño de colmenas: Altas temperaturas. Hasta hace poco, las temperaturas elevadas han sido consideradas una amenaza para las colonias de abejas (Decourtye *et al.*, 2019). En climas cálidos hay menor cantidad de estudios enfocados en los tipos de colmenas y materiales potenciales para la conserva del microclima. Actualmente las pérdidas anuales de verano han aumentado año tras año (Steinhauer *et al.*, 2021). Los mecanismos de termorregulación en temperaturas muy elevadas traen consigo la disminución del rendimiento de las colonias por el exceso de gasto

energético, además, en zonas áridas el problema es complejo, puesto que las temperaturas elevadas van de la mano con niveles de humedad muy bajos. Existen pocos diseños de colmenas documentados específicamente para climas cálidos; sin embargo, esto debería de recibir una mayor atención, especialmente por el aumento de las olas de calor (Marshall *et al.*, 2020; Menzel *et al.*, 2021).

Abou-Shaara y colaboradores (2013) evaluaron distintos tipos de colmenas en dos razas de abejas: *A. m. carnica* y *A. m. jemenitica*, subespecies nativas de Yemen en la Península Arábiga bajo una temperatura promedio de $37\pm 1.2^{\circ}\text{C}$. Las colonias evaluadas mostraron resultados significativamente distintos en cuanto a la actividad de forrajeo, presencia de enfermedades y temperaturas promedio dependiendo de la raza de abeja. Tomando en cuenta ambas razas, el diseño más eficiente resultó la colmena termorreguladora equipada con un equipo de refrigeración y ventilación, la cual presentó una reducción de $9.8\pm 0^{\circ}\text{C}$ en el interior de la colmena. Este tipo de colmenas es el más eficiente, ya que reduce significativamente la temperatura al punto que las abejas melíferas no necesiten regular la temperatura. Sin embargo, las colmenas con equipos especializados para refrigeración o calefacción podrían no ser la opción más apta para apiarios a gran escala, si se considera la rentabilidad de los equipos y costo por mantenimiento.

La colmena aislada con cajón trasero lleno de agua presentó una reducción promedio de $8.3\pm 0.4^{\circ}\text{C}$. El diseño consistió en una colmena de madera rodeada con material aislante (10mm), a la cual se le adhirió un cajón trasero el cual se llena de agua para proporcionar una fuente de humedad y aislamiento térmico. Esta colmena resultó con un gran potencial para la eficiencia de termorregulación en colmenas que se ubiquen en zonas áridas, ya que la fuente de humedad en zonas con humedad media o alta podría traer consigo problemas de sanidad (Eouzan *et al.*, 2019). Erdoğan y colaboradores (2019) evaluaron una colmena similar a la colmena aislada propuesta por Abou-Shaara y colaboradores (2013) excluyendo el cajón trasero. Las condiciones fueron en verano con una temperatura promedio de $31.2\pm 4.0^{\circ}\text{C}$. No se detallaron especificaciones respecto al grosor del material aislante en el estudio, ni la raza de abeja utilizada, pero resultó ser la colmena evaluada con mejores resultados comprando con material poliestireno y madera. Además de mantener una temperatura menor en el interior de la colmena con pocas oscilaciones comparado con los otros dos tratamientos, obtuvo un mayor aumento en ganancia de peso 27.9% mayor que las de poliestireno y un 19.8% más que las de madera.

Las investigaciones previas han tenido resultados significativos modificando ciertos componentes

en la colmena, pero se requiere de mayor investigación en el desarrollo de componentes de la colmena que brinden las capacidades específicas que se necesitan para la temperatura que predomine en la región de interés. Esto considerando además la raza de abeja que se produzca, ya que como se ha mencionado, ciertas razas tienen mejores adaptaciones a climas en los cuales se ha desarrollado (Abou-Shaara *et al.*, 2017). A pesar de que existen alternativas apícolas más desarrolladas y sofisticadas como la ‘Apicultura de Precisión’, hay poca investigación respecto a componentes más simples y rentables que podrían brindar mejora en las capacidades termorreguladoras de las abejas en climas extremos. Tomando en cuenta que los apicultores mexicanos mayormente pertenecen al sector rural se requieren estrategias viables para este sector (Magaña Magaña *et al.*, 2016).

2.6. Perspectivas y Diseño de Componentes para Colmenas Bajo Temperaturas Extremas

Evidentemente se requieren investigaciones sobre evaluaciones de diseño de colmenas por las amenazas actuales y como éstas tienen efectos sinérgicos frente a las condiciones climáticas extremas (Abou-Shaara *et al.*, 2013; Alattal *et al.*, 2015; Alburaki *et al.*, 2021; Erdoğan, 2019; Floris *et al.*, 2020). La apicultura es una actividad pecuaria que se considera sustentable por los múltiples beneficios que brinda la presencia de abejas al ecosistema y para preservarla es importante considerar modificaciones en las prácticas apícolas tradicionales. Como lo son, las alternativas de diseños de colmenas más específicas dependiendo del clima predominante en la zona de interés, así como la raza de abeja melífera que se maneje, considerando que tienen distintas capacidades adaptativas hacia la termorregulación.

El uso conjunto de materiales como madera y el poliestireno como recubrimiento son una combinación de materiales que mejoran las propiedades térmicas de aislamiento, reducen las interacciones de transferencia de calor y disminuyen las oscilaciones cinéticas (Erdoğan, 2019). Se sabe que la madera se caracteriza por sus propiedades térmicas bajas, esto debido a que es un material poroso y a su vez, higroscópico, lo que implica que retiene o exuda agua, dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad, haciendo que el contenido varíe dependiendo de las condiciones ambientales (Mitchell, 2019). Por otro lado, el poliestireno expandido se caracteriza

por sus propiedades de baja conductividad térmica, una baja absorción de humedad, pero con potenciales propiedades amortiguantes hacia cambios bruscos en el ambiente. Se podría esperar que la sinergia de aislamiento con poliestireno y madera podría dar lugar a la mejora de eficiencia de termorregulación en colmenas que se encuentran bajo condiciones extremas como temperaturas altas o muy bajas, siempre y cuando sean adecuadas al del ambiente (Erdoğan, 2019; Wolfslehner *et al.*, 2019).

Además, el adaptar la colmena con componentes de ventilación, favorecería a su vez la termorregulación, ya que mejoraría la circulación de aire viciado al exterior de la colmena trayendo consigo disminuciones de temperatura en el interior del nido (Abou-Saahara, *et al.* 2013). También disminuyendo las concentraciones de alta humedad, las cuales crean condiciones asfixiantes y afectan mayormente especialmente a zonas con colmenas con especies africanizadas, las cuales se caracterizan por su baja capacidad de termorregulación. Estos cambios en la colmena brindarían potencialmente una mejora en la eficacia de termorregulación para climas extremos, trayendo consigo múltiples beneficios. La regulación de la temperatura disminuiría la agresividad, enjambrazón y fuga de las colonias, ya que se propiciaría un ambiente más adecuado para sus actividades. No habría un desperdicio energético constantemente con el intento de regular las condiciones microclimáticas, lo que daría mayor oportunidad de recolección de recursos. Esto a su vez traería un aumento en la postura de cría y número de obreras, por lo que aumentaría la productividad. En base a todo lo mencionado anteriormente se plantea la siguiente hipótesis.

3. HIPÓTESIS

Bajo condiciones de temperaturas extremas (altas o bajas) la incorporación de componentes de ventilación y aislamiento en colmenas, según se trate, aumentan la eficiencia termorreguladora en colonias de abejas *Apis mellifera*.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Evaluar el efecto sinérgico de los sistemas de aislamiento térmico y ventilación de las cámaras de cría sobre la termorregulación de las colmenas de abejas en condiciones de temperaturas extremas altas y bajas.

4.2. Objetivos Específicos

1. Monitorear la cinética de temperatura y humedad relativa en función de la incorporación de elementos de aislamiento en las cámaras de cría de las colmenas en bajas temperaturas.
2. Monitorear la cinética de temperatura y humedad relativa en función de la incorporación de elementos de aislamiento y ventilación en las cámaras de cría de las colmenas bajo altas temperaturas.
3. Estimación de fuerza de la colonia en función al tratamiento en condiciones de altas temperaturas.
4. Evaluar el comportamiento defensivo de la colonia de abejas en función al tratamiento sometido en condiciones de altas temperaturas.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Área de Estudio

Las áreas de estudio fueron seleccionadas por las condiciones climáticas extremas que se presentan en la temporada de verano e invierno, además por la disponibilidad y disposición del uso de los apiarios. En los estados de Sonora y Chihuahua la apicultura se sostiene principalmente de dos servicios, de la polinización por las abejas en la agricultura y en la producción de miel y otros productos de la colmena. Se tomó en cuenta que no hay uso de pesticidas en terrenos aledaños a los apiarios en que se llevó a cabo este trabajo.

5.1.1. Evaluación Altas Temperaturas: Desierto Sonorense

Esta evaluación se realizó bajo las temperaturas cálidas del Desierto Sonorense, en Hermosillo Sonora en el apiario ‘El Abuelo’ ubicado en la localidad Mesa del Seri sobre las coordenadas 29.07276, -110.82345 y a una altitud de 238 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El clima es desértico cálido seco, durante la mayor parte del año las temperaturas son muy calurosas, contando con cuatro meses de extremo calor, junio, julio, agosto y septiembre. Llegando alcanzar temperaturas máximas de hasta 48°C (CONAGUA, 2021). Durante el experimento se proveyó de una fuente de agua continua en el apiario.

5.1.2. Evaluación en Bajas Temperaturas: Altiplano Chihuahuense

La evaluación bajo temperaturas invernales extremas se realizó en el Altiplano Chihuahuense, en el apiario ubicado en el Valle de Bustillos en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua sobre las

coordenadas 28.430608, -106.849980 y a una altitud de 2100 m.s.n.m. El clima característico de la región es templado semiseco, con veranos cálidos e inviernos fríos, siendo los meses más fríos diciembre, enero y febrero. Llegando alcanzar temperaturas mínimas de hasta -10°C (CONAGUA, 2021).



Figura 4. Fotografía del sitio aproximado de en Hermosillo, Sonora y el sitio exacto del apiario 'El Abuelo'



Figura 5. Fotografía del sitio aproximado en Cuauhtémoc, Chihuahua y el sitio exacto del apiario

5.2. Metodología

5.2.1. Genotipo de *Apis Mellifera* Utilizado

Las colmenas utilizadas en la evaluación de verano e invierno son el resultado de hibridaciones

tanto inducidas, como involuntarias. En principio la subespecie utilizada fue la italiana *Apis m. ligustica*, sin embargo, en el reemplazo rutinario de reinas se ha introducido el linaje carniola (*Apis m. carnica*) y estando ubicados en una zona de africanización es altamente probable que ocurra hibridación con zánganos de *Apis m. scutellata*. De tal forma que podemos suponer que estos tres linajes están presentes en todas las colmenas utilizadas en este trabajo.

5.2.2. Incorporación de Complementos en la Colmena

Los componentes de ventilación y de aislamiento fueron adaptados a una cámara de cría Langstroth convencional como se muestra en la Figura 6. La colmena es de madera y está compuesta por un piso de 37.5cm de ancho y 55cm de largo; la cámara de cría de 37.5cm de ancho, 48.5cm de largo y 24cm de alto dentro de la cual se colocan diez bastidores (Langstroth, 1852). Un alza de medidas similares a la cámara cría, con la diferencia que se colocan solo ocho bastidores, se pueden agregar más alzas dependiendo de la producción de miel. Por último, se tiene una entre tapa y un techo de madera cubierto con lámina galvanizada (Langstroth, 1852).

El componente de aislamiento consistió en cubrir el exterior del cuerpo de la colmena con una lámina de poliestireno expandido de 3cm de grosor, seguida de una capa de material conglomerado el cual posteriormente se impermeabilizó y pintó de color blanco. Se fabricaron las cuatro caras de la colmena a la medida (48.5x37.5x50cm los laterales y de 37.5x34cm cara trasera y frontal), fueron pegadas con pegamento para madera a la colmena estándar y luego atornilladas sobre cada esquina como se muestra en la Figura 7. Al final se sellaron las orillas con una cinta metálica para evitar la entrada de humedad hacia las paredes adheridas. El sobre techo consistió en una lámina de poliestireno expandido de 5cm de grosor entre dos láminas de material conglomerado de madera con la función de generar un amortiguamiento térmico contra el calor que entra por el techo.

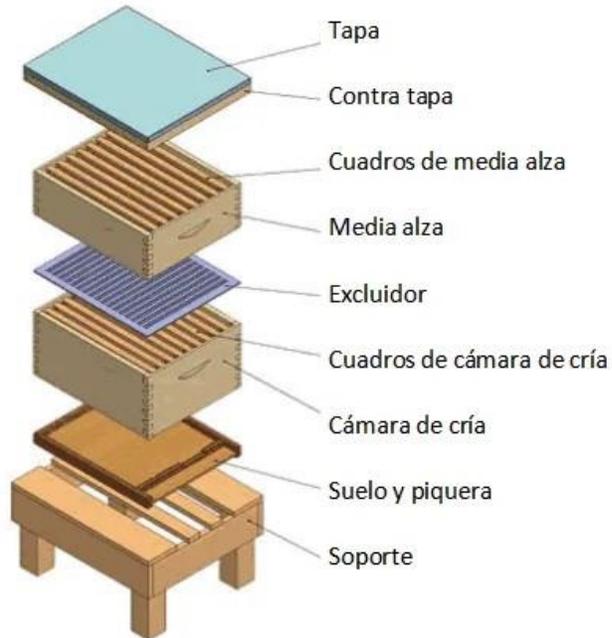


Figura 6. Representación de las partes que integran una colmena Langstroth estándar



Figura 7. Parte superior del componente de aislamiento y del componente de ventilación

Por otro lado, el sistema de ventilación como se muestra en la Figura 6 consiste en un alza a la mitad de la altura convencional a la cual se realizaron perforaciones en la cara posterior de la colmena, dichas perforaciones fueron cubiertas con tela mosquitera metálica para evitar el ingreso de fauna dañina, así como en el fondo del alza para evitar el paso de las abejas. A lo largo del experimento a las colmenas que lo requirieron se le agregaron alzas dependiendo de su

productividad. Tanto el componente de aislamiento como ventilación son removibles por lo que se pueden adherir y retirar de las colmenas cuando sea necesario, por ejemplo, para realizar la trashumancia para disminuir el peso y facilitar la transportación, en temporadas de lluvias o simplemente condiciones climáticas que no requieran de su uso.

El experimento para la evaluación de altas temperaturas consistió en cuatro tratamientos con una sola unidad experimental (colonia de abejas) para cada uno debido a la limitación de colmenas disponibles. Los tratamientos se fueron alternando en cada una de las unidades experimentales hasta que todas fueron sometidas a cada uno de ellos, es decir, este experimento consistió en 4 repeticiones por evaluación como se muestra en el Cuadro 3: a) Testigo experimental (TE) (colmena sin complementos sobre base metálica), b). Colmena con aislamiento (A), c). Colmena con ventilación (V) y d). Colmena con aislamiento y ventilación (V+A).

Además de hacer uso de los complementos, las colmenas fueron colocadas sobre bases metálicas como se muestra en la Figura 9 para evitar la transferencia de calor del suelo hacia el interior de las colmenas, el uso de estas bases también facilita el trabajo de inspección para el apicultor. En la tercera repetición del experimento se añadió un quinto tratamiento denominado ‘Testigo comercial’ (TC), el cual consistió en una colmena sin complementos colocada directamente en el suelo, ya que es la forma en la que se suelen manejar las colmenas en los apiarios comerciales, considerando que el uso de las bases metálicas minimiza la transferencia por conducción del calor que es absorbido por el suelo.

Para fines de la evaluación de bajas temperaturas se tomó en cuenta solamente la comparación del tratamiento de aislamiento (A) contra el testigo (T) y no se consideró el componente de ventilación cuyo fin de expulsar el calor y en invierno el objetivo es conservar condiciones cálidas en el interior de la colmena. El número de repeticiones fue de cuatro unidades experimentales para cada tratamiento, A y T. Las colmenas fueron colocadas directamente sobre el suelo como se práctica comúnmente por lo que no se requirió del uso de un Testigo adicional como en la evaluación de altas temperaturas.

Cuadro 3. Representación de las unidades experimentales sometidas a los tratamientos en evaluación de altas temperaturas

Repetición	Colonia 1	Colonia 2	Colonia 3	Colonia 4
1	A= Testigo	B= Ventilación	C= Aislamiento	D= Ventilación + Aislamiento
2	D= Ventilación + Aislamiento	A= Testigo	B= Ventilación	C= Aislamiento
3	C= Aislamiento	D= Ventilación + Aislamiento	A= Testigo	B= Ventilación
4	B= Ventilación	C= Aislamiento	D= Ventilación + Aislamiento	A= Testigo

5.2.3. Monitoreo de Cinética de Temperatura y Humedad Relativa

La cinética de temperatura y humedad relativa fue registrada por un registrador de datos HOBO UX100-003 (Onset Computer Corporation. E.U.A.). Los rangos operativos de estos instrumentos son -20°C a 70°C , con una precisión $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ en un rango efectivo de 0°C a 50°C y una resolución de 0.024°C . Los rangos de registro de nivel de humedad relativa son de 15% a 95%; precisión de $\pm 3.5\%$ de 25% a 85% y una resolución de 0.07%. El registrador se colocó en el interior de la colmena en el quinto bastidor sobre el nido de cría, debido a que es la zona objetivo sobre la cual se realizan los mecanismos de termorregulación por parte de la colonia para mantener las temperaturas óptimas (Figura 8).

El rango de temperatura que se tomó como óptimo fue de $34-36^{\circ}\text{C}$ en la cámara de cría (Groh *et al.*, 2004; Jones y Oldroyd, 2006; Tautz *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2016). La humedad relativa óptima se consideró cerca del 65%, la cual se reporta como el más adecuado para el buen desarrollo de las larvas (Ellis *et al.*, 2008; Tautz *et al.*, 2003). Con el fin de registrar las oscilaciones de las variables en el ambiente y conocer el amortiguamiento térmico de los materiales se colocó un registrador del mismo modelo en las mesas utilizadas para colocar las colmenas.



Figura 8. Registrador HOBO UX100 y posición en la cual se colocó sobre un bastidor en el centro del nido de cría.

El registro de temperaturas cálidas tuvo una duración de cuatro meses en la temporada de verano 2022 (junio, julio, agosto y septiembre) y se realizó una segunda repetición en verano 2023. La evaluación de invierno se realizó por 3 meses: diciembre, enero, febrero del 2023. En temporada de verano el registrador tuvo un rango de operación de las 8:00 h a las 17:00 h y en invierno un rango de 17:00 h a 8:00 h por ser los rangos de temperatura más críticos para cada temporada, las colmenas estuvieron expuestas a sol directo (Figura 9). Los datos se tomaron con un intervalo de registro de 30 minutos y se colectaron los datos cada 10 días consecutivos.



Figura 9. Tratamientos experimentales en la evaluación de verano sobre mesa de soporte



Figura 10. Tratamiento Testigo Comercial en evaluación de verano colocada en el suelo

Los registradores fueron envueltos en cinta aislante para evitar que las abejas cubrieran con propóleos los sensores y puerto para extracción de datos. Primeramente, se realizó una evaluación de las colmenas vacías sin y con bastidores para evaluar la eficiencia de amortiguamiento térmico por los materiales evaluados la cual tuvo una duración de siete días, esta evaluación solo se realizó en temporada de verano, en invierno no fue posible debido a la falta de tiempo. Después éstas se evaluaron con colonias de abejas melíferas híbridas (*A. mellifera spp.*) con poblaciones de magnitud similar para minimizar el margen de error sobre la evaluación de la eficiencia termorreguladora.

5.2.4. Preparación de Colonias de *Apis mellifera*

Para la preparación de las colmenas estándar se colocaron núcleos de abejas italianas (*Apis m. ligústica*) y éstos fueron monitoreados durante un mes y medio para proceder a la selección de colonias a utilizar para el experimento. La selección se realizó en base a una aproximación del tamaño de la población de abejas adultas que consiste en el conteo de bastidores cubiertos con abejas propuesto por Nasr y colaboradores (1990), así como por el estado sanitario de la colonia que se determinó con observaciones en busca de algún signo de enfermedad o plaga. Para la

introducción de las colonias de abejas a las colmenas experimentales con sus respectivos componentes de acuerdo a su tratamiento, los marcos se introdujeron a la nueva cámara de cría y se agitaron y cepillaron las paredes del cuerpo de la colmena para lograr incorporar la mayoría de las abejas en la nueva colmena.

5.2.4.1. Selección por Conteo de Bastidores Cubiertos descrita por Nasr y colaboradores (1990). La población de abejas adultas define parte de la fuerza de la colonia. Es un método visual muy sencillo, el cual no toma mucho tiempo como otros métodos más precisos, sin embargo, es un método efectivo en casos que se comparan colonias de edades similares.

Para el procedimiento, se levantó la tapa de la colmena y se observó cuidadosamente la parte superior de los marcos (bastidores). El conteo se realizó estimando el área del bastidor cubierto por abejas y anotando la estimación por ambos lados en cada uno de los diez bastidores de la cámara de cría. El mismo procedimiento se realizó para el conteo de población en alza. Se estimó la población tomándose como la superficie de un bastidor cubierto completamente de abejas (100%) y en caso de solo una porción está cubierta se estimó el porcentaje. Al final se realizó una suma donde el resultado de la aproximación se expresa en número de bastidores cubiertos por colmena. Para la selección de colonias en el experimento se revisaron doce colmenas distintas, las cuales aún no contaban con alza y se tomaron en cuenta las poblaciones que contenían entre seis y siete bastidores cubiertos como se muestra en la Figura 11. A las cuatro poblaciones seleccionadas, al considerarse suficientemente fuertes se les colocó un alza para permitir el crecimiento de la población y evitar la formación de enjambres, luego se procedió al inicio de la captura de datos.



Figura 11. Fotografía de cámara de cría con un estimado de 6.2 bastidores cubiertos

5.2.5. Estimación de Fuerza de la Colonia: Método Liebefeld

La estimación de fuerza en una colonia influye directamente en la población de abejas adultas, así como en la cantidad de cría, lo que se correlaciona directamente con la cantidad de miel producida (Farrar, 1937). De igual forma con el número de pecoreadoras disponibles para brindar el servicio de la polinización (Keller *et al.*, 2005). El método Liebefeld es una herramienta confiable para medir la fuerza y desarrollo de las colonias a lo largo del tiempo.

El método Liebefeld (Imdorf *et al.*, 1987; Dainat *et al.*, 2020;) consiste en una estimación visual del número de abejas adultas que cubren la superficie de cada lado de los bastidores (dm^2). El número de trabajadoras adultas se estimó en valores absolutos en lugar de decímetros cuadrados, para ajustar en tiempo real, la densidad variable de obreras en un bastidor (es decir, abejas en capas superpuestas o con la cabeza dentro de las celdas). Para estimar el número de trabajadoras adultas, se estimó la relación entre el área de superficie total de la cara de un bastidor y el área de superficie cubierta por trabajadoras adultas. Después se multiplicó el número de dm^2 que se encontraron en una cara del bastidor por el valor de referencia que se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Valores de referencia para cálculo de población adulta. Fuente: Imdorf A. (2010)

Tipo de bastidor	Superficie por cara de bastidor (dm²) (cámara de cría)	Superficie por cara de bastidor (dm²) (alza)	Número de obreras por cara de bastidor
Langstroth	8.5	4.5	1,100

Con este mismo método fue medida el área cubierta por cría específicamente de obreras, cría de zánganos, polen y miel con las proporciones que se muestran en el Cuadro 5. La cantidad de cría y las reservas de alimentos se expresan como la superficie (número de decímetros cuadrados) cubierta estimada. Originalmente para este conteo de superficie cubierta se hizo uso de un acetato transparente cuadriculado, como el que se muestra en la Figura 12, el cual se sobrepuso en el bastidor y se fotografió con esto se mejoró la precisión del conteo. Adicionalmente, en este estudio se hizo el uso de análisis de imágenes digitales (Sección 5.2.5.1).

La estimación de la población varía directamente según el horario del conteo debido a la salida a pecorear que realizan las abejas. Por este motivo intentando controlar esta condición, las fotografías en las distintas repeticiones fueron tomadas a las 10:00 am, también se registró la temperatura ambiental a dicha hora. Las colmenas fueron ahumadas ligeramente en la piquera, se abrieron y se evaluó en orden bastidor por bastidor por ambos lados (A y B).

Cuadro 5. Valores de referencia de medida (mm) de celdas de cría y miel. Fuente: Imdorf A., 2010.

Ancho de celda (mm)	
Obrera	5.4
Zángano	6.5
Miel por dm² (g)	150

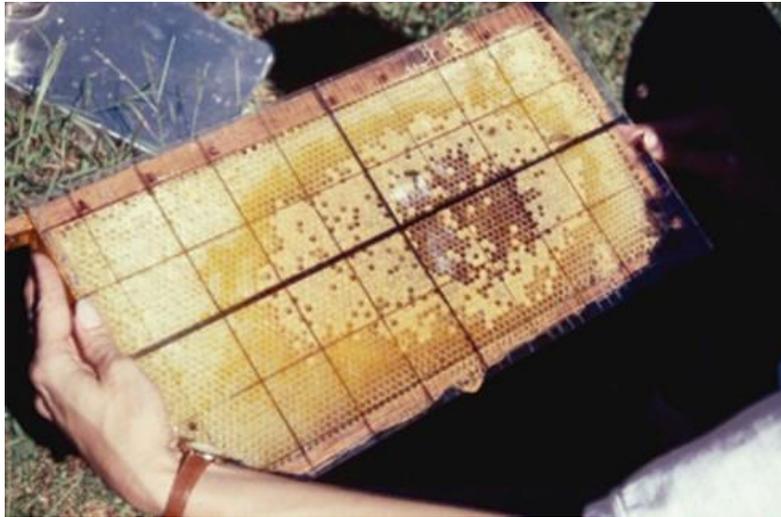


Figura 12. Acetato cuadrulado (dm^2) para medición de fuerza de la colonia (Delaplane *et al.*, 2013)

5.2.5.1. Estimación de fuerza de la colonia en base a análisis de imágenes digitales. Con la finalidad de facilitar la labor de campo, debido a la agresividad de las abejas y el acortar el tiempo de manipulación de las colonias por el estrés que les genera, se hizo el uso de análisis de imágenes para la estimación de fuerza. Se tomaron un total de veinte fotografías por colmena debido a que contaban con 10 bastidores cada una y se fotografiaron ambos lados. Las fotografías fueron tomadas con una GoPro Hero 10 Black con ayuda de un soporte de correa de muñeca.

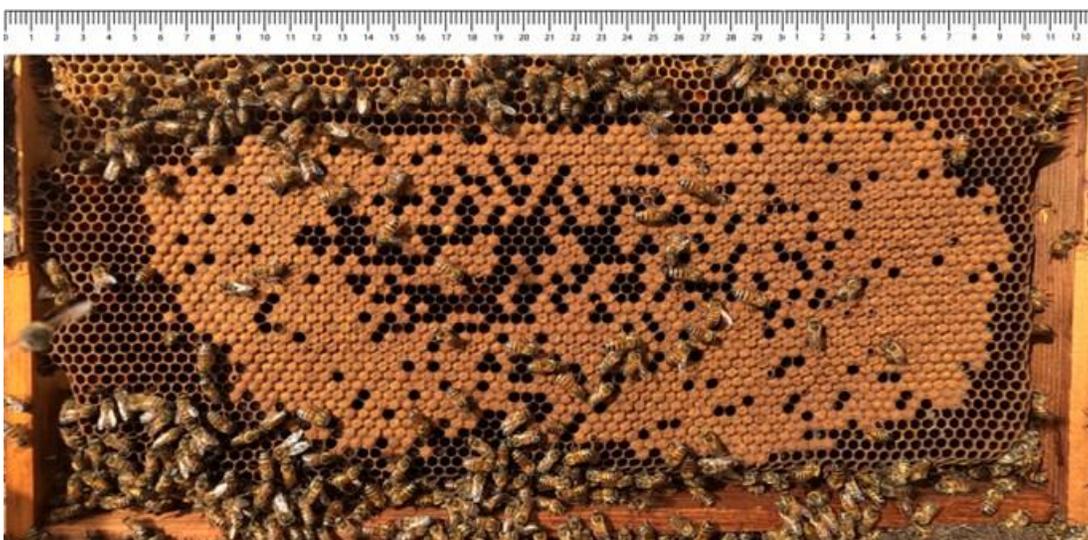


Figura 13. Fotografía editada con regla en la parte superior para ajustar escala a la longitud del bastidor (42.5cm)

Las imágenes fueron procesadas en el programa ImageJ 1.54d (Java 1.8.0_345, 64-bit) disponible gratuitamente en <http://rsbweb.nih.gov/ij/>. El procedimiento se muestra en la (Figura 16) que representa un diagrama general de los pasos a seguir. Para ajustar la escala de la imagen se editaron las fotografías con una regla en la parte superior (Figura 13), ajustándola a la longitud del bastidor que consta de 42.5 cm lo que resultó una escala de 71.2471 pixeles/cm. Para el conteo de número de abejas, polen, cría y miel con los valores absolutos del método Liebefeld se utilizó la herramienta ‘Grid’ (Rejilla) ajustando las medidas por 1dm² por cuadrícula (Figura 15). Cuando era posible contabilizar manualmente el número de abejas se hizo uso de la herramienta ‘Multi-point’ con la cual se coloca un punto en cada abeja y se va realizando un conteo automático en el software (Figura 14). Al tener el conteo por cada cuadrante, el resultado fue interpretado en dm² y éste fue registrándose en un formato en tabla de Excel (Cuadro 6). Las áreas de cría, polen y miel no fueron medidas completamente, debido a que solo se tomó en cuenta la sección que se podía observar, a pesar de que las abejas estaban sobre el bastidor, sin embargo, estas variables son de importancia para conocer el desarrollo de la colonia.



Figura 14. Conteo de abejas con la herramienta ‘Multi-point’, cada cruz de color gris numera cada abeja

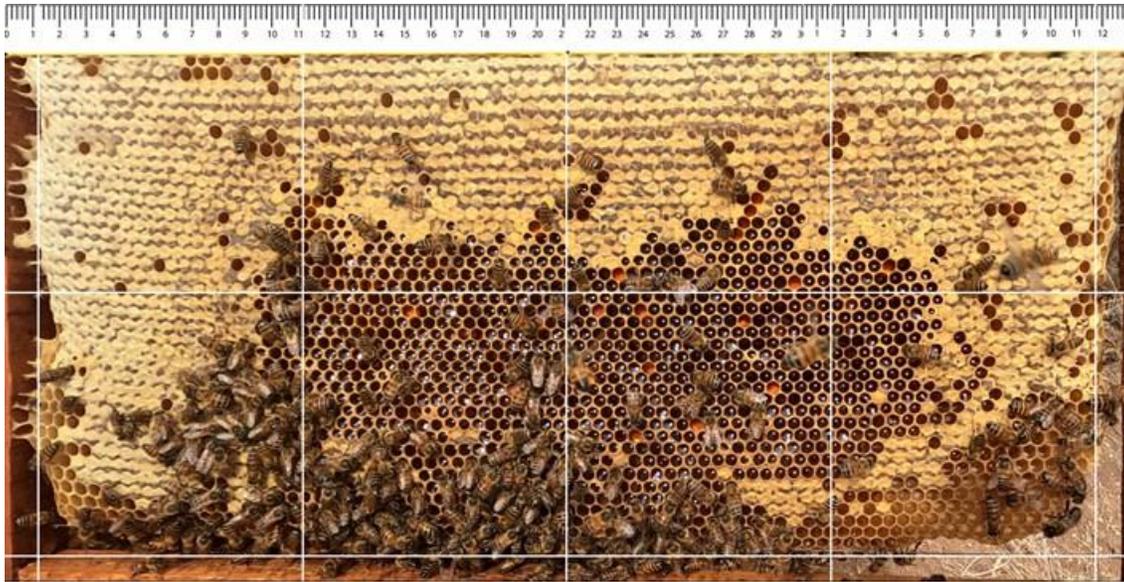


Figura 15. Fotografía con cuadrícula de 1dm² utilizando la herramienta 'Grid'

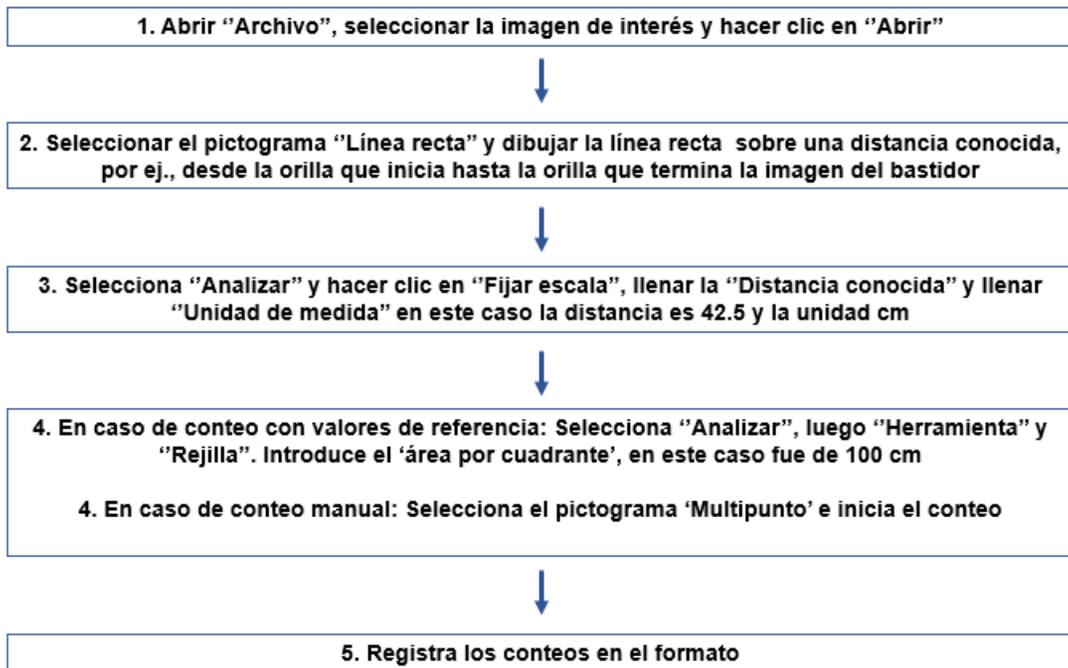


Figura 16. Procedimiento del uso de ImageJ para realizar la estimación por dm² o conteo manual de abejas en un bastidor

Cuadro 6. Formato de registro para estimación de fuerza de la colonia. Los datos fueron registrados en dm² y al final se estimó la proporción con los valores de referencia del total de obreras, cría, polen y miel.

Día/Hora:						
Colonia:				Temperatura:		
Observaciones:						
Bastidor	Cámara de Cría					
	Obreras Adultas	dm²				
		Cría cerrada	Cría abierta	Cría de zángano	Polen	Miel
1a						
1b						
2a						
2b						
3a						
3b						
4a						
4b						
5a						
5b						
6a						
6b						
7a						
7b						
8a						
8b						
9a						
9b						
10a						
10b						
Total dm²						
Total n						

5.2.6. Evaluación del Comportamiento Defensivo

Se han documentado varios factores que influyen sobre el comportamiento defensivo de las abejas. La cantidad de recursos disponibles, la presencia o ausencia de la reina, los factores genéticos y los factores ambientales. El hecho de que las abejas estén enfadadas o tranquilas afecta

considerablemente al rendimiento de la producción de miel, por lo que es una variable importante a medir. En este estudio se utilizó la metodología planteada por Stort (1974) que se describe a continuación.

Para evaluar la respuesta defensiva se utilizó un blanco en movimiento, en este caso se utilizó una pelota de goma envuelta con un trozo de gamuza negra, a la cual se le colocó una argolla para amarrar un trozo de cuerda sujeta a una varilla para facilitar el movimiento (Figura 17). Después de provocar el comportamiento defensivo mediante un par de fuertes golpes en la parte trasera de la colmena, el blanco fue agitado en la piquera durante un minuto, luego ésta se retiró de la zona, se ahumó la pelota para ahuyentar a las abejas luego se colocó en una bolsa hermética y posteriormente se realizó el conteo de aguijones (Figura 19), lo que determinó la medida de agresión de las colonias. El horario en cual se realizó la prueba y las variables meteorológicas de humedad relativa y temperatura fueron registradas durante las pruebas de campo para determinar si existe alguna variable que cause un mayor comportamiento agresivo. La prueba fue realizada en la segunda evaluación de verano en mayo del 2023.



Figura 17. Pelota cubierta con gamuza negra sometida a prueba de comportamiento defensivo



Figura 18. Pelota de goma envuelta en gamuza mostrando los agujones después de ser sometida a la prueba de comportamiento defensivo

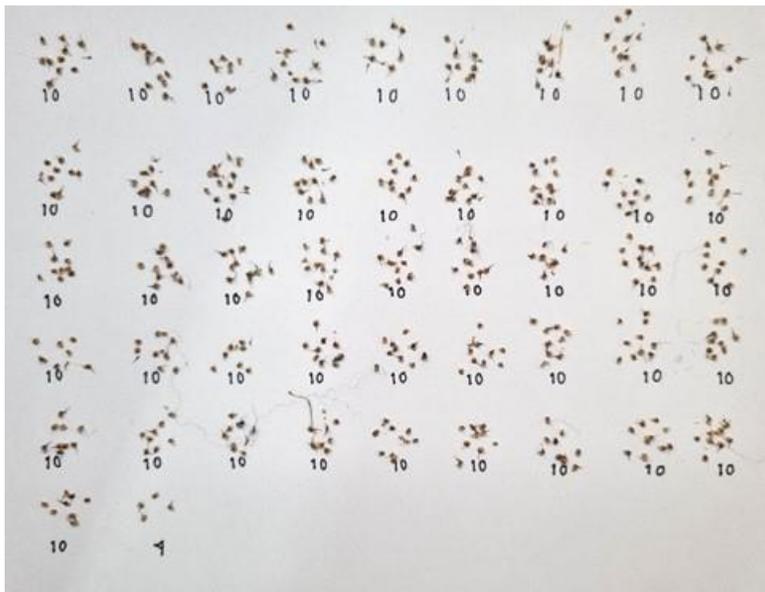


Figura 19. Contabilización de número de agujones para la prueba de comportamiento defensivo

5.2.7. Análisis Estadístico

5.2.7.1 Evaluación de altas temperaturas (verano).

5.2.7.1.1. Cinética de temperatura y humedad relativa. El diseño experimental se llevó a cabo utilizando un cuadro latino 4x4 repetido en los años 2022 y 2023, con un total de 8 repeticiones. Este modelo incorpora tres factores aditivos: el período experimental (que corresponde a los diferentes años de estudio), las colonias y los tratamientos (componentes de aislamiento y ventilación). Es importante destacar que el tamaño de muestra se limitó a una unidad experimental para la evaluación de altas temperaturas, lo que justificó la realización de duplicados. El análisis de los resultados se llevó a cabo de manera independiente para los veranos de 2022 y 2023, así como para el conjunto de datos de ambos años, mediante un ANOVA GLM. Como se mencionó previamente, en la tercera repetición del experimento se incorporó un quinto tratamiento conocido como 'Testigo comercial' (TC). Debido a esta adición, el análisis de las variables de temperatura y humedad relativa se realizaron de manera independiente respecto a los demás tratamientos, utilizando un diseño completamente al azar.

5.2.7.1.2. Estimación de fuerza de la colonia. Se realizó un análisis de varianza GLM para un diseño completamente al azar para cada una de las variables: número de obreras adultas y cría. Por otro lado, se contabilizó la cantidad de miel almacenada y se analizó mediante estadística descriptiva, por lo que fueron estas tres variables a analizar en relación a los tratamientos (componentes de aislamiento y ventilación). Cada tratamiento experimental se repitió cuatro veces.

5.2.7.1.3. Comportamiento defensivo. Se realizó un ANOVA de una vía, siendo la variable respuesta el número de agujones encontrados en la gamuza y el efecto fijo de los tratamientos experimentales. No se tomó en cuenta el tratamiento testigo comercial debido a fuga del enjambre. Se realizaron cuatro repeticiones para la medición de esta variable.

Cuando se encontraron efectos significativos debido a los tratamientos, se realizaron comparaciones de medias por la prueba de comparación múltiple de la diferencia mínima significativa (LSD). Todos los análisis se realizaron a un nivel de significancia de 0.05 en el error tipo I. Los datos fueron procesados en el software estadístico MiniTab 17.

5.2.7.2. Evaluación a bajas temperaturas (invierno). Para la evaluación de los parámetros de la colmena durante la época de frío, se utilizó un ANOVA de una vía, donde el modelo incluyó el efecto de los tratamientos sometidos (sólo se probaron los tratamientos testigo y aislamiento) y el error experimental. El tamaño de muestra fue de cuatro unidades experimentales para cada tratamiento. Las significancias se estimaron a una $p < 0.05$ en el error tipo I, usando el software MiniTab 17.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Evaluación Bajo Condiciones Cálidas Extremas

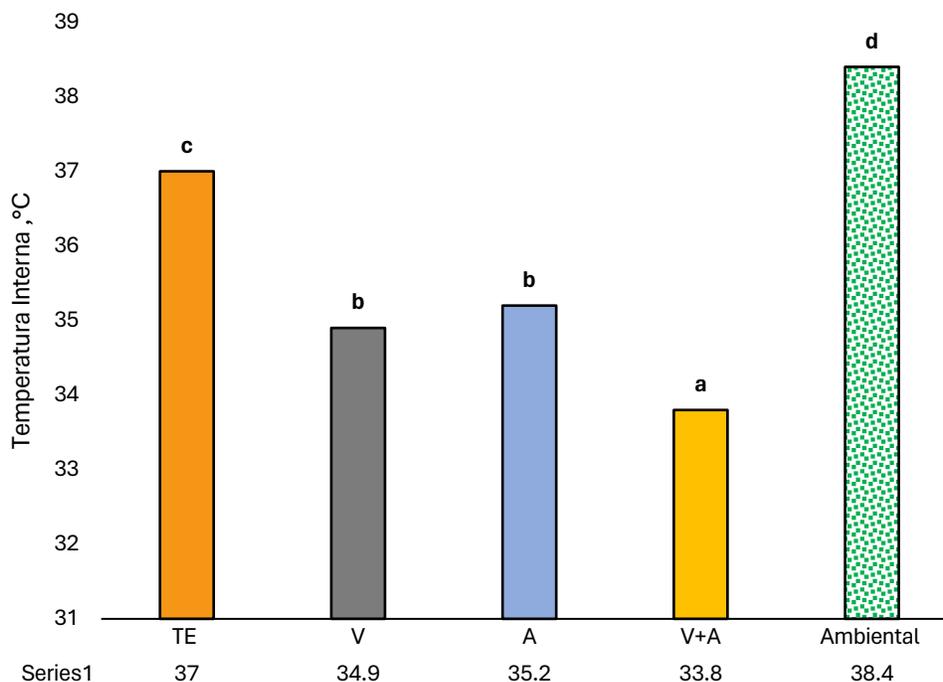
6.1.1. Cinética de Temperatura y Humedad Relativa (HR)

6.1.1.1. Evaluación de colmenas vacías. En primer lugar, se llevó a cabo una evaluación de los tratamientos sin población de abejas con el propósito de determinar el rendimiento del amortiguamiento térmico en relación con los componentes incorporados. Esta evaluación de colmenas vacías se realizó a lo largo de siete días, del 1 al 7 de junio de 2022. Durante el análisis de los datos, se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos ($P < 0.05$).

En cuanto a los resultados (Figura 20), la temperatura interna más alta se registró en el tratamiento TE, alcanzando los 37°C , con una tasa de reducción de temperatura de solo 3% (Cuadro 7). Los tratamientos con A y V obtuvieron resultados estadísticamente similares ($P > 0.05$), con temperaturas de 35.2 y 34.9°C , respectivamente. Finalmente, el tratamiento V+A presentó 33.8°C que fue el que mostró la menor recarga de calor, presentando la temperatura más baja y diferente ($P > 0.05$) de los otros tratamientos, con una tasa de reducción del 11%. Los resultados indican que el tratamiento TE tiene un menor abatimiento en la temperatura interna en comparación con los otros.

Cuadro 7. Diferencial de reducción de temperatura interna en los tratamientos

Tasa de reducción temperatura interna (%)	TE	V	A	V+A
	3	9	8	11

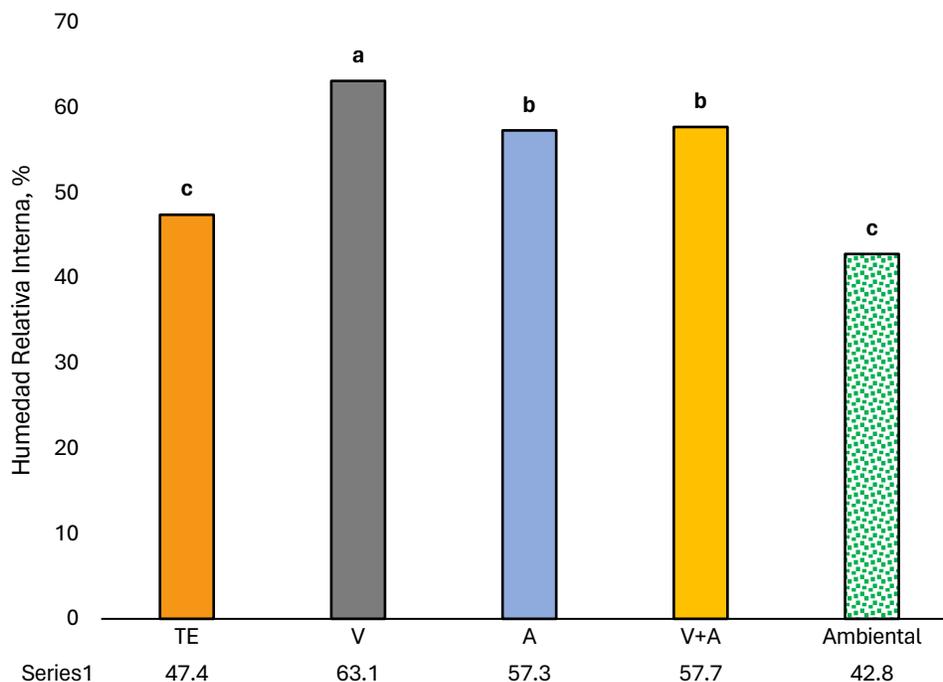


Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 20. Temperatura interna promedio en tratamientos sin población de abejas

En relación con la cinética de la HR (Figura 21), se encontraron diferencias entre los tratamientos evaluados ($P < 0.05$). El tratamiento V registró el mayor nivel de HR, alcanzando un 63.1%, seguido por el tratamiento que combinó V+A con un 57.7% y el tratamiento A con un 57.3%. En último lugar, TE alcanzó un 47.4%. Es importante destacar que se observó una alta variabilidad en los niveles de humedad relativa en todos los tratamientos, posiblemente debido a la presencia casi continua de precipitaciones durante el período de evaluación donde se obtuvo un promedio de 42.8% en la HR ambiental. Esta situación condujo a valores máximos de humedad relativamente altos en los cuatro tratamientos.

Después de completar la evaluación de las colmenas vacías, se procedió a introducir las poblaciones de abejas en sus respectivos tratamientos. En este punto, se observó que las variables de temperatura y humedad relativa tienden a ser más estables debido a los mecanismos de termorregulación de las abejas (Ohashi, 2008). Esto indica que la presencia de las abejas en las colmenas contribuyó a mantener condiciones más constantes en lo que respecta a la temperatura y humedad relativa.



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 21. Humedad promedio en tratamientos sin población de abejas

6.1.1.2. Evaluación de termorregulación con abejas. Las mediciones de temperatura y HR ambiental e interna en las colmenas se llevaron a cabo en el período comprendido entre las 8:00 y las 17:00 horas, ya que este intervalo corresponde al momento crítico en el que las temperaturas alcanzan condiciones extremas durante la temporada de verano. Sin embargo, es importante señalar que el verano de 2022 no resultó tan extremo como en años anteriores, debido a la influencia del fenómeno de La Niña, que trajo consigo un aumento de las precipitaciones (CONAGUA, 2022). En comparación, el verano de 2023 estuvo marcado por el regreso del fenómeno de El Niño, caracterizado por el aumento de las temperaturas ambientales.

6.1.1.3. Verano 2022. Durante el verano de 2022, se registró un rango de temperatura ambiental de $34.5 \pm 6.5^\circ\text{C}$. Es relevante destacar que, en este período, la temperatura ambiente mostró consistentemente la variación más amplia de valores máximos y mínimos en comparación con las condiciones dentro de las colmenas experimentales (Figura 22). Este hallazgo sugiere que las abejas implementaron mecanismos efectivos de termorregulación (Ohashi, 2008). Se encontraron

diferencias significativas ($P>0.05$) en los tratamientos para la variable temperatura.

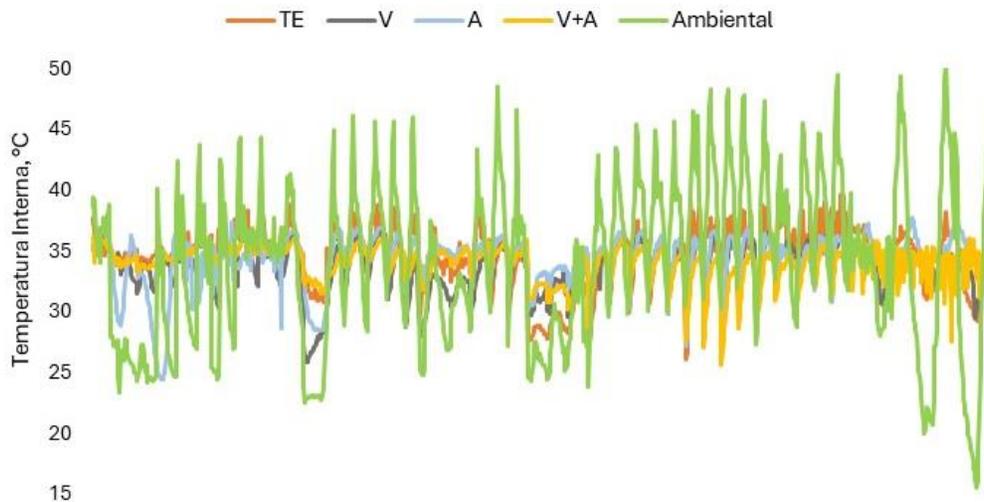
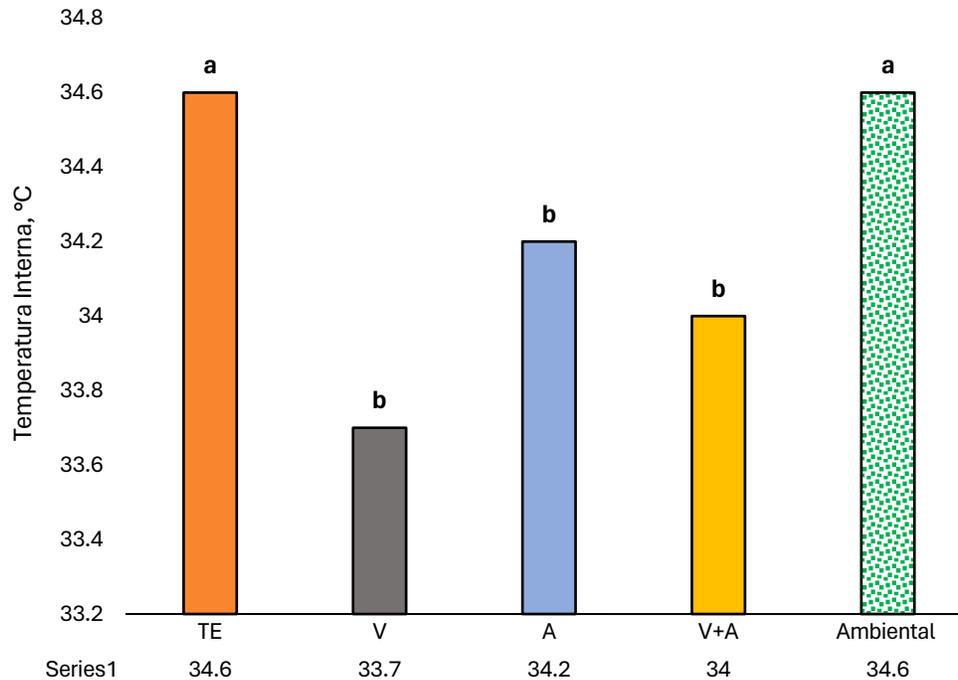


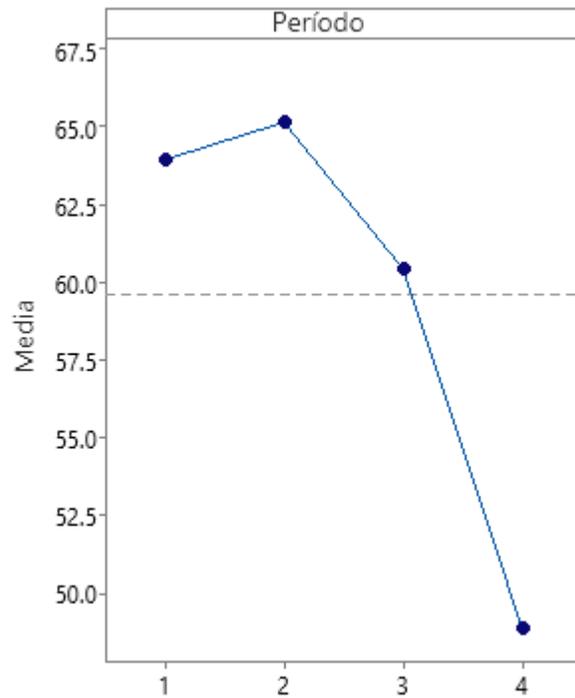
Figura 22. Cinética de temperaturas internas y ambientales en el verano de 2022

En lo que respecta a la temperatura interna de los tratamientos (Figura 23), se observó que el tratamiento V presentó el mayor descenso con $33.7\pm 2.01^{\circ}\text{C}$, lo que equivale a una reducción del 2.6% en comparación con la temperatura ambiente. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas ($P>0.05$) con los tratamientos V+A y A, que mantuvieron temperaturas internas de $33.7\pm 1.51^{\circ}\text{C}$ (con una reducción del 1.7%) y $34.2\pm 2.20^{\circ}\text{C}$ (con una reducción del 1.2%), respectivamente. Finalmente, TE presentó la mayor temperatura promedio con $34.6\pm 2.50^{\circ}\text{C}$ y no presentó reducción. A pesar de estas variaciones, todas las colmenas mostraron una tasa de reducción y una temperatura promedio óptima para el adecuado funcionamiento de la colonia, sin ocasionar estrés térmico bajo una temperatura ambiente promedio de 34.6°C .



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD
Figura 23. Temperaturas internas promedio de las colmenas experimentales en verano 2022

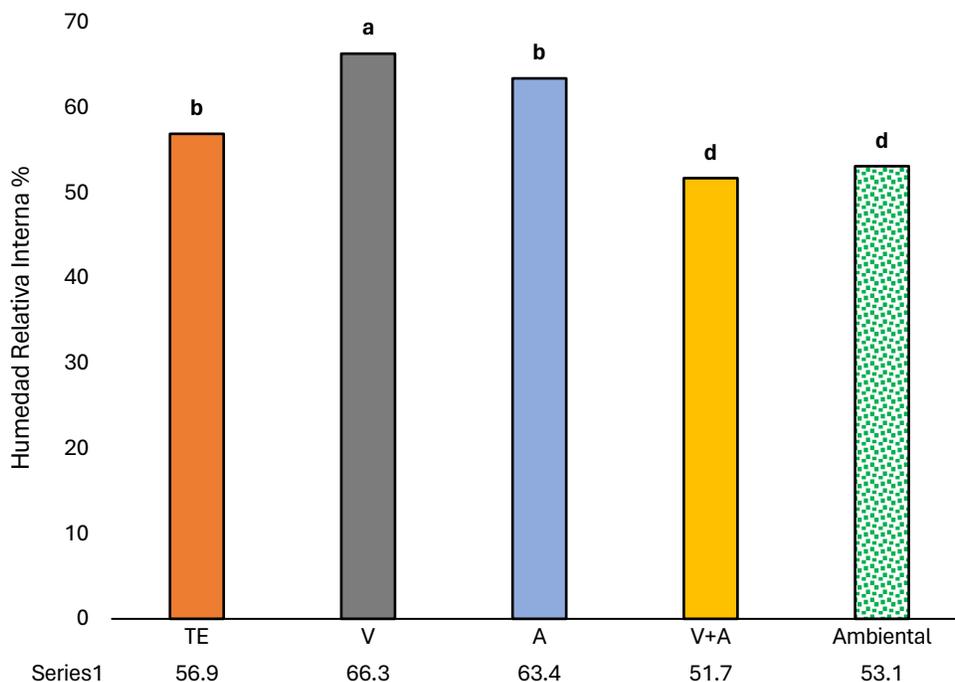
Respecto a la HR debido a precipitaciones se presentaron altos valores en el periodo experimental. Los factores de tratamiento y período resultaron significativos ($P < 0.05$) Los períodos (junio, julio, agosto y septiembre) resultaron diferentes entre ellos debido a las lluvias (Figura 24). El valor máximo en la humedad ambiental registrado fue de un 100%, indicando la presencia de lluvia, mientras que el valor más bajo fue de 15.5%. El mes de julio destacó como el período más húmedo, con una media de 65.6%, lo que se reflejó en un aumento de la HR interna en las colmenas durante ese período.



Período: 1= Junio, 2= Julio, 3=Agosto, 4= Septiembre

Figura 24. Variaciones en la humedad relativa ambiental en los meses de verano 2022

Se registraron diferencias ($P < 0.05$) en la HR interna en las colmenas (Figura 25). El tratamiento V+A reportó el mayor abatimiento de humedad interna oscilando entre $51.7 \pm 8.5\%$, seguido de las colmenas TE y A con $56.9 \pm 10.3\%$ y $63.4 \pm 5.4\%$ respectivamente. Por otro lado, la colmena V alcanzó el mayor porcentaje y variación en humedad relativa, con un valor de $66.3 \pm 15.9\%$. Esto se debió a que el sistema de ventilación permitió la entrada de agua en la colmena originado por el hundimiento de las patas de la estructura de soporte, lo que provocó la entrada de agua por la piquera.

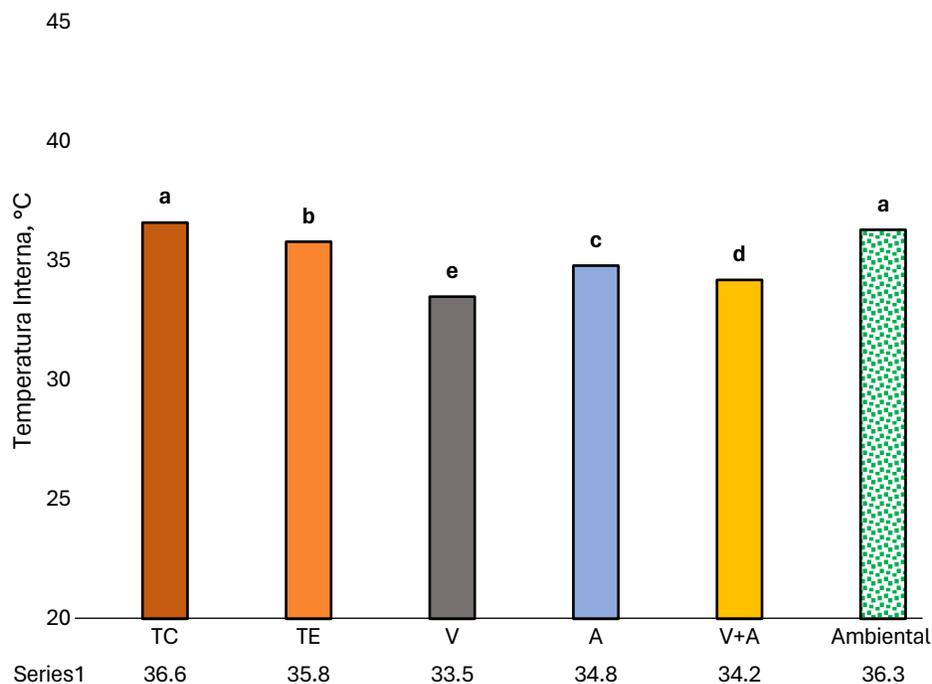


Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 25. Humedad relativa interna promedio de las colmenas experimentales en verano 2022

6.1.1.4. Verano 2023. La temporada de verano de 2023 se caracterizó por ser notablemente más cálida y árida en comparación con el año anterior. Durante este periodo, se registró una temperatura promedio de $36.3 \pm 7.9^\circ\text{C}$, lo que representó un aumento significativo en comparación con el verano de 2022, que tuvo una temperatura promedio de $34.5 \pm 6.5^\circ\text{C}$. Las temperaturas oscilaron entre un mínimo de 14.9°C y un máximo de 56.9°C . Las temperaturas cálidas extremas durante el verano de 2023 resultaron significativas entre los distintos tratamientos ($P < 0.05$).

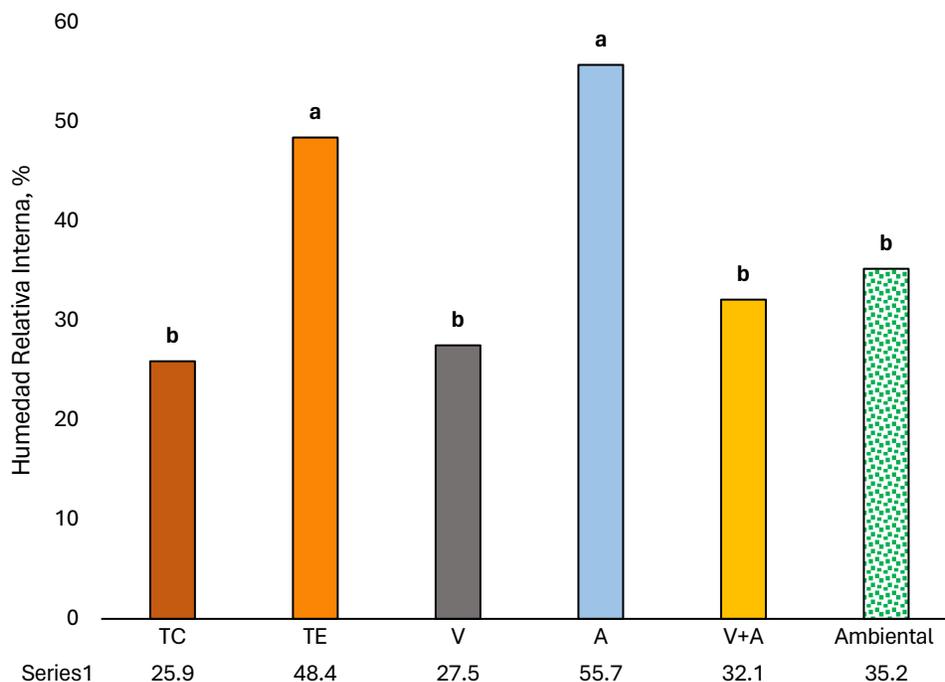
En la Figura 26 se observa que el tratamiento que registró la temperatura más baja fue V, con un promedio de $33.5 \pm 2.5^\circ\text{C}$; no obstante, este tratamiento también presentó la mayor variabilidad en las temperaturas. La colmena V+A tuvo una media de $34.2 \pm 0.9^\circ\text{C}$, siendo el tratamiento con las condiciones más estables. Por otro lado, el tratamiento A obtuvo una media de 34.8 ± 2.0 y TE $35.8 \pm 2.3^\circ\text{C}$. Finalmente, la colmena TC registró la temperatura más alta, con una media de $36.6 \pm 2.83^\circ\text{C}$, siendo similar ($P > 0.05$) al promedio de temperatura ambiental de $36.3 \pm 7.9^\circ\text{C}$.



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 26. Temperatura interna de las colmenas por tratamiento en verano 2023

En cuanto a la HR, se observó un efecto significativo del tratamiento ($P < 0.05$). Destaca que la HR ambiental fue notablemente inferior en comparación con el año anterior, con una media de $35.2 \pm 16.3\%$. Específicamente, los tratamientos A ($55.7 \pm 11.2\%$) y TE ($48.4 \pm 10.8\%$) presentaron los niveles más elevados de HR interna, y, a su vez, experimentaron la mayor variabilidad en la cinética de la HR, como se evidencia en la desviación estándar más alta. En contraste, los demás tratamientos no mostraron diferencias significativas en la humedad relativa interna ($P > 0.05$). El tratamiento V+A ($32.1 \pm 2.9\%$) destacó por tener la menor variación entre todos los tratamientos, seguido por V ($27.5 \pm 6.6\%$) y el TC ($25.9 \pm 6.5\%$), cuyos valores se mantuvieron estadísticamente similares ($P > 0.05$) (Figura 26). Es notorio que los tratamientos que incluyeron ventilación presentaron valores estadísticamente más bajos que el resto y muy similares entre sí, lo que hace suponer que la ventilación se alcanza al abatir los excesos de humedad en el interior de la colmena.

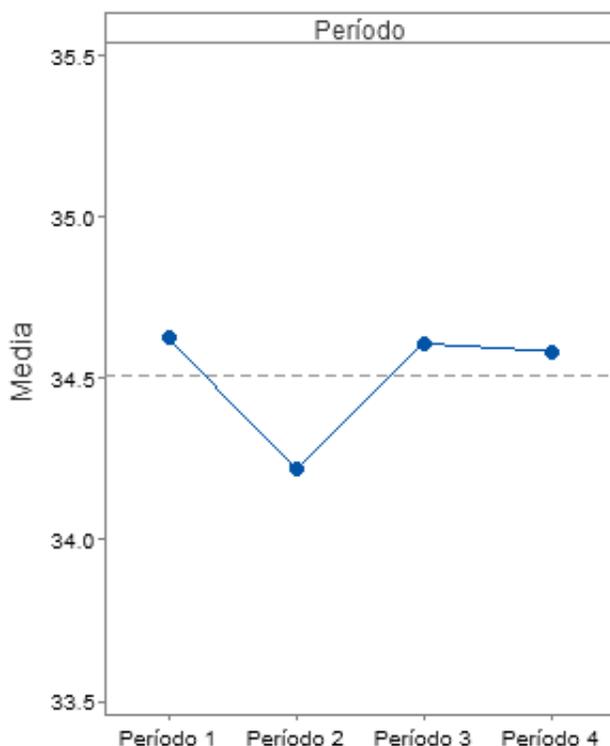


Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 27. Humedad relativa interna de las colmenas por tratamiento en verano 2023

6.1.1.5. Veranos 2022 y 2023 combinados. Tras un análisis individual de cada temporada de verano, se procedió a realizar un análisis de los datos en conjunto con el fin de evaluar el impacto de los tratamientos, utilizando la mayor cantidad de datos disponibles. Los resultados revelaron que la temperatura fue significativamente influenciada, tanto por los tratamientos y el período experimental ($p < 0.05$)

Como se demuestra claramente en la Figura 28 el efecto principal del periodo, los períodos más cálidos fueron junio y agosto. Mientras que el mes de julio fue el menos cálido. Este fenómeno se debió a la presencia de una serie de lluvias de verano durante este mes, lo que resultó en una reducción de la temperatura ambiental y, por ende, de la temperatura interna de las colmenas.

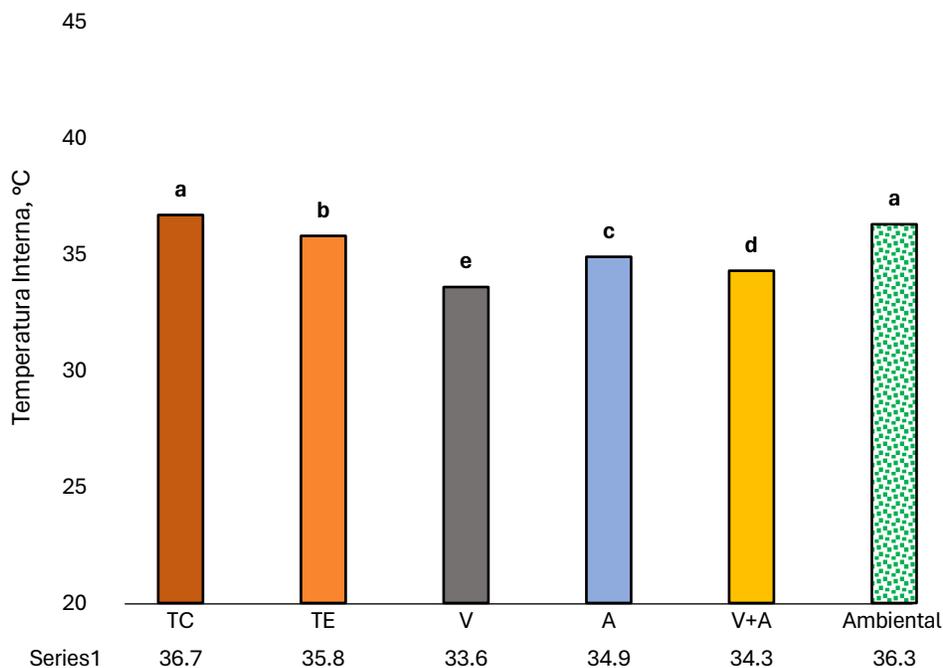


Período: 1= Junio, 2= Julio, 3=Agosto, 4= Septiembre

Figura 28. Evolución de los cambios en temperatura durante los períodos de evaluación por dos años consecutivos 2022 y 2023.

Respecto al efecto de los tratamientos sobre la temperatura interna de la colmena, también se observó un efecto significativo ($p < 0.05$) de los tratamientos (Figura 29). Es importante destacar que la mayoría de los tratamientos mantuvieron una media de temperatura que se situaba dentro del rango óptimo, a excepción del testigo comercial. La media de temperatura ambiental fue de $36.3 \pm 8.0^\circ\text{C}$.

El tratamiento V demostró ser el más efectivo en la reducción de la temperatura interna, con una disminución del 7.6% en comparación con la temperatura ambiental, presentando una media de $33.6 \pm 2.5^\circ\text{C}$. Le siguió el tratamiento V+A, que logró una reducción del 5.6% y registró una media de $34.3 \pm 1.3^\circ\text{C}$, caracterizándose por tener la menor variabilidad en la cinética de la temperatura interna. En tercer lugar, el tratamiento A mostró una reducción del 4.02%, con una media de $34.9 \pm 2^\circ\text{C}$. Mientras que TE registró una disminución mínima del 1.2% con una media de temperatura de $35.8 \pm 2.4^\circ\text{C}$. Por último, el TC se destacó negativamente al presentar un aumento del 0.99% en la temperatura interna, con una media de $36.7 \pm 2.8^\circ\text{C}$.

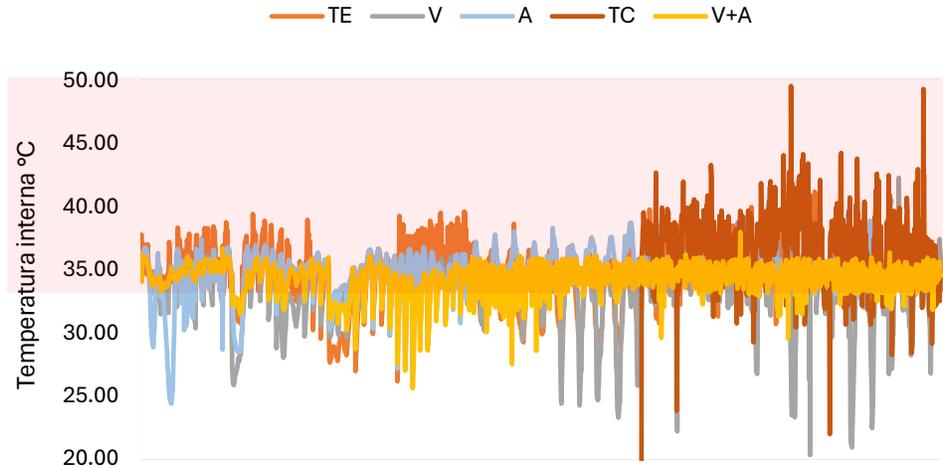


Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

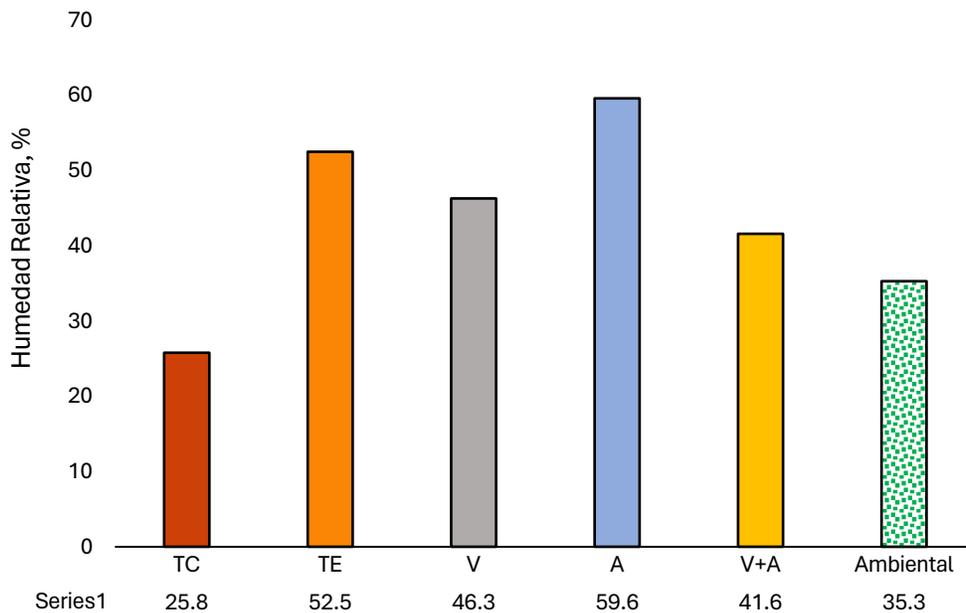
Figura 29. Temperatura interna de las colmenas experimentales en verano 2022 y 2023

En relación a la HR durante el período conjunto de 2022-2023, ésta no mostró ser significativa ($P > 0.05$) para ninguno de los factores analizados. Esto podría deberse a la amplia variabilidad de las condiciones ambientales que prevalecieron en ambas temporadas (Figura 30). Es importante destacar que la media de la HR ambiental en 2022 fue de $53.2 \pm 23.0\%$, mientras que en 2023 fue de $35.3 \pm 16.4\%$.

Estas marcadas diferencias en la HR ambiental contribuyeron a que ninguno de los factores a saber, ejerciera una influencia significativa sobre la HR interna. La variabilidad en las condiciones ambientales jugó un papel fundamental en estos resultados. A pesar de esto se puede observar que los tratamientos presentaron distintas condiciones en cuanto al amortiguamiento de la HR interna (Figura 31).



El color rojo por encima de los 36.5 °C indica cuando inicia la temperatura crítica para las abejas melíferas
Figura 30. Cinética de temperatura interna de los tratamientos en los veranos 2022 y 2023



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD
Figura 31. Humedad relativa interna promedio de las colmenas experimentales en los veranos 2022 y 2023

Los resultados indican que una mayor temperatura interna se asocia principalmente con las colmenas convencionales en comparación con las colmenas equipadas con complementos de aislamiento y ventilación, que contribuyen a una mayor eficiencia en los mecanismos de

termorregulación. Estos hallazgos respaldan investigaciones previas, como el estudio de Abou-Shaara y colaboradores (2013), quienes encontraron que las colmenas modificadas con dispositivos de ventilación electrónica y colmenas aisladas con cajones traseros mantenían temperaturas internas más bajas que las colmenas estándar durante el verano, cuando la temperatura ambiente alcanzaba los $37\pm 1.2^{\circ}\text{C}$. También se alinean con la investigación de Erdoğan (2019), que demostró una mayor estabilidad en el microclima en colmenas construidas con madera-poliuretano y poliuretano en condiciones de verano, aunque la temperatura media de evaluación fue de $31.2\pm 4.0^{\circ}\text{C}$, considerada una temperatura ideal para las abejas melíferas.

Sin embargo, estos resultados contradicen el estudio de Lorenzon y colaboradores (2004), quienes desarrollaron colmenas compuestas de cemento y vermiculita, donde las colmenas de madera mostraron una mayor reducción de la temperatura interna a una temperatura ambiente de $29.8\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. Habiendo que considerar que la madera conduce calor en menor grado que el cemento, además de que las condiciones climáticas en que se evaluó este experimento no pueden considerarse extremas de ninguna forma.

Particularmente, las colmenas V+A demostraron mantener condiciones microclimáticas de temperatura y HR más estables de manera constante en comparación con los otros tratamientos. Por lo tanto, una recomendación inicial podría ser la adopción de la sinergia entre los compuestos de aislamiento y ventilación. Cabe destacar que el estudio se desarrolló colocando las colmenas sobre mesas metálicas de 30cm de altura con el fin de reducir la conducción del calor desde el suelo hacia el interior de la colmena. Es evidente que los 30cm de la altura de las mesas representan un espacio que permite una reducción considerable de la conducción de la energía radiante del suelo hacia las colmenas.

No obstante, el uso conjunto de estos dos complementos podría no ser viable desde una perspectiva económica y práctica. En términos económicos, se debe considerar la inversión requerida para adquirir los complementos y los soportes metálicos, así como la durabilidad del complemento de aislamiento. A pesar de estos desafíos, esta combinación de aislamiento y ventilación parece ser una alternativa más asequible en comparación con el uso de dispositivos electrónicos para enfriar las colmenas (Cousin *et al.*, 2019). Aunque hay que considerar que, para la apicultura trashumante, la implementación de estos complementos puede resultar impráctica debido al peso adicional que genera, especialmente en colmenas altamente productivas llenas de miel. Sin embargo, esta estrategia se presenta como una alternativa viable y sencilla para los productores que practican la

apicultura sedentaria en regiones cálidas y áridas, sin causar problemas significativos.

La reducción de la temperatura interna en V+A se atribuye a la presencia de los complementos de aislamiento y ventilación. El aislamiento con poliestireno y MDF (fibropanel de densidad media) mejora las propiedades térmicas, reduciendo las interacciones de transferencia de calor y, por lo tanto, disminuyendo las oscilaciones cinéticas de temperatura y de HR. Por otro lado, el componente V crea un efecto de chimenea a través de las perforaciones traseras, permitiendo la evacuación del aire viciado y caliente y el exceso de humedad. La humedad relativa en las colmenas experimentó variaciones a lo largo de los períodos de evaluación en los distintos tratamientos, influenciada por las condiciones de precipitación.

Por otro lado, el complemento V se destacó como el segundo tratamiento más efectivo, demostrando un buen amortiguamiento térmico gracias a la expulsión de calor a través de las perforaciones traseras causantes del efecto chimenea. Sin embargo, se observaron considerables fluctuaciones en las oscilaciones de temperatura y HR. En el caso de la HR, las variaciones se debieron a la entrada de agua durante las lluvias, aunque esto fue más el resultado de un accidente, dado que el anegamiento del suelo causó un hundimiento de las patas traseras de la mesa, lo cual permitió la entrada de lluvia por las piqueras que quedaron en una posición elevada. Por lo tanto, este complemento se presenta como una elección ideal para regiones con condiciones cálidas y áridas. No obstante, se recomienda retirarlo en caso de pronósticos de precipitaciones para evitar la entrada de agua. En términos de durabilidad, este complemento puede resistir durante el mismo período que una colmena convencional, ya que se fabrica con el mismo material, en este caso, madera de pino.

A pesar de mantener condiciones promedio óptimas en el microclima, un efecto negativo fue que se presenten variaciones notables en la cinética de HR y temperatura. Estas variaciones podrían tener repercusiones, como estrés térmico en las abejas (Wang *et al.*, 2016), un mayor consumo de recursos, la interrupción del ciclo de cría debido a la disminución en la oviposición por la reina ((McAfee *et al.*, 2020; Preston *et al.*, 2019) y un impacto negativo en el desarrollo de las larvas (Groh *et al.*, 2004). A largo plazo, estas condiciones podrían resultar en problemas de salud en la población de la colonia de abejas.

Continuando con el análisis del tratamiento A, este componente mantuvo un buen amortiguamiento térmico en la colmena. De hecho, su efectividad estaba respaldada previamente por Erdoğan (2019) en condiciones menos cálidas ($31.2 \pm 4.0^\circ\text{C}$). Sin embargo, en este experimento se descubrió que,

a pesar de que se considere normal experimentar variaciones en la humedad relativa, o que se requiere alta HR durante el período intensivo de producción de crías, como se ha señalado en estudios previos (Eouzan *et al.*, 2019), la HR en este tratamiento se mantenía constantemente elevada, independientemente de las condiciones ambientales. Este hallazgo plantea preocupaciones, ya que un exceso de puede tener repercusiones de orden sanitario.

El alto nivel de HR constante en la colmena podría incrementar el riesgo de enfermedades patógenas, como hongos y bacterias, que afectan la salud de las abejas (Monchanin *et al.*, 2019). Además, puede influir negativamente en la calidad de los alimentos almacenados, como el polen y la miel, ya que el exceso de humedad puede desencadenar procesos de fermentación en estos alimentos.

Las condiciones de alta HR a su vez pueden generar estrés térmico, especialmente cuando se combinan con temperaturas extremas, como en este caso condiciones muy cálidas. Esto puede llevar a que las abejas tengan temperamentos más agresivos, debido a su estado de irritabilidad (Erdoğan, 2019; Nouvian *et al.*, 2016).

En resumen, el exceso de HR en las colmenas puede generar diversas repercusiones que afectan la salud y el bienestar de la colonia. Por lo tanto, es importante mantener un equilibrio adecuado en los niveles. Esto puede explicar por qué la combinación de aislamiento y ventilación (V+A) resultó ser más conveniente, ya que proporciona un amortiguamiento térmico eficaz sin generar constantes niveles elevados de HR.

Prosiguiendo con el tratamiento TE resultó el tercero en obtener las condiciones adecuadas. Sin embargo, los resultados de temperatura fueron alarmantes, debido a que llegó a presentar temperaturas internas máximas de hasta 43.6°C alcanzando temperaturas críticas para el bienestar de las abejas melíferas. A pesar de esto en contraste a TC presentó mejores resultados, debido a que las colmenas estaban colocadas sobre la mesa. Resultando que TC presentara temperaturas de hasta 49.6°C debido a la transferencia de calor del suelo hacia el interior de la colmena. Afectando diversas funciones en la colonia, desde comportamiento, desarrollo, colecta de alimento y de reproducción. Se ha documentado que temperaturas por encima de los 38°C afectan la viabilidad del esperma (McAfee *et al.*, 2020; Preston *et al.*, 2019), por lo que disminuye la fecundación y con ello disminuyendo de manera concatenante la eficiencia reproductiva de la reina, consecuentemente las crías sobrevivientes nacen con deficiencias morfológicas y neuronales (Groh *et al.*, 2004; Tautz *et al.*, 2003), lo que puede llevar a ser una colonia indefensa y por ende propensa

a ser afectada por cualquier tipo de estrés ya sea térmico, enfermedad, pillaje, entre otros (Sturp *et al.*, 2013).

Esta evaluación proporcionó una perspectiva del cómo al adherir distintos materiales-complementos a las colmenas convencionales puede o no beneficiar la conservación del microclima óptimo para el buen desarrollo de la colonia. Lo que resalta la importancia del efecto de los factores ambientales como temperatura y la HR. Los resultados sugieren que la combinación de aislamiento y ventilación (V+A) podría ser una solución eficaz para mantener condiciones microclimáticas óptimas en las colmenas en entornos cálidos y áridos. A su vez se desarrollaron pruebas para determinar si el tratamiento influye en otras variables como la cantidad de población, productos de la colmena y comportamiento defensivo que se presentan a continuación.

6.1.2. Estimación de fuerza de la colonia: Método Liebefeld

La estimación de fuerza de una colonia de abejas influye directamente en la población de abejas adultas y cría (Farrar, 1937). Variables fundamentales para mantener una colonia sana, robusta y productiva en términos de los productos y servicios proporcionados por las abejas melíferas (Keller *et al.*, 2005). Para estimar dicha fuerza, empleamos el método Liebefeld, que tiene en cuenta tres variables clave: el número de abejas adultas, la cantidad de cría y la producción de miel.

Es importante destacar que este método proporciona una estimación de la fuerza de la colonia, ya que la medición precisa de toda la población requeriría del uso de métodos complementarios que incluyan la población de obreras pecoreadoras. Además, nuestros conteos se llevaron a cabo a las 10:00 am, momento en el que las pecoreadoras están fuera de la colmena recolectando recursos, lo que podría influir en los resultados. Lo mismo se aplica al conteo de cría, ya que no pudimos inspeccionar completamente los bastidores sin presencia de abejas debido al comportamiento defensivo. En cuanto a la miel, solo pudimos considerar la cantidad visible en los bastidores de la cámara de cría y en las áreas accesibles, ya que la presencia de abejas, cría, polen, entre otros, dificultó la medición en otras áreas.



Figura 32. Bastidor del tratamiento de ventilación + aislamiento (V+A) con un área de cría de 7 dm²

En relación a los resultados de la fuerza de la colonia, la única variable que resultó significativa entre los tratamientos fue el número de obreras adultas ($P < 0.05$), mientras que el área de cría ($P > 0.05$) no resultó significativa y la cantidad de miel almacenada solo pudo ser analizada por estadística descriptiva. El Cuadro 8 indica que el mayor número de obreras resultó en el tratamiento V, con una estimación promedio de $7,694 \pm 1,378$ abejas adultas (incluyendo obreras y zánganos); además esta colmena resultó ser la segunda con mayor cantidad de área de cría con 14.5 ± 13.4 dm² y cantidad de miel almacenada $6,870$ mL/dm². Enseguida los tratamientos TE y V+A resultaron similares en la estimación de obreras adultas y en el área de cría ($5,618 \pm 1,644$ obreras adultas, 12.4 ± 11.0 dm² y $5,266 \pm 3,661$ obreras adultas, 18.8 ± 12.8 dm² respectivamente), pero el tratamiento V+A resultó almacenar mayor cantidad de miel con $7,290$ mL/dm² siendo la colmena con mayor producción de miel. Finalmente, los tratamientos TC y A fueron los que obtuvieron menor cantidad de obreras adultas, área de cría y miel. Siendo el tratamiento con aislamiento la colmena que presentó los valores mínimos en comparación del resto de tratamientos.

Cuadro 8. Resultados obtenidos de la medición de estimación de fuerza de la colonia para las variables número de abejas adultas, área de cría y cantidad de miel almacenada en los distintos tratamientos

Tratamiento	Número de abejas adultas	Área de cría (dm²)	Miel (mL/dm²)
Testigo experimental	5,618 ^{ab} ± 1,644	12.4 ^a ± 11.0	3415.0
Ventilación	7,694 ^a ± 1,378	14.5 ^a ± 13.4	6,870.0
Aislamiento	1,586 ^{bc} ± 712	4.5 ^a ± 0.1	1,012.5
Aislamiento + Ventilación	5,266 ^{ab} ± 3,661	18.8 ^a ± 12.8	7,290.0

Dentro de las columnas, las medias con la misma letra no son significativamente distintas ($P < 0.05$), según la prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD)

Los resultados revelan que el método Liebefeld, aunque proporciona una estimación adecuada de la fuerza de la colonia, es una aproximación que no reemplaza la necesidad de métodos más exhaustivos y muestreos en diferentes momentos del día y con un mayor tamaño de muestra para comprender mejor la actividad de recolección de néctar.

En los tratamientos evaluados, las colmenas que incluyeron V y V+A demostraron la mayor fuerza en la colonia, con aumentos significativos en las variables estudiadas. Estos resultados sugieren que los complementos de V y V+A desempeñaron un papel importante en el fortalecimiento de las colonias, respaldados por la estabilidad de las condiciones de temperatura y humedad ambiental en el entorno de la colmena. Nuestros hallazgos coinciden con investigaciones previas, como el estudio de Al-Kahtani (2003), que encontró que las colmenas provistas con un dispositivo 'Bee Cool' con ventiladores solares registraron áreas de cría más grandes y mayor almacenamiento de miel. En contraste, el tratamiento de aislamiento mostró un bajo rendimiento, lo que concuerda con los resultados de Abou Shaara y colaboradores (2013) y puede explicarse por la tendencia a mantener niveles constantes de humedad, lo que podría afectar negativamente la eficiencia termorreguladora de las abejas obreras.



Figura 33. Bastidor del tratamiento de ventilación + aislamiento mostrando las celdas operculadas y almacenadas con 1050 mL de miel

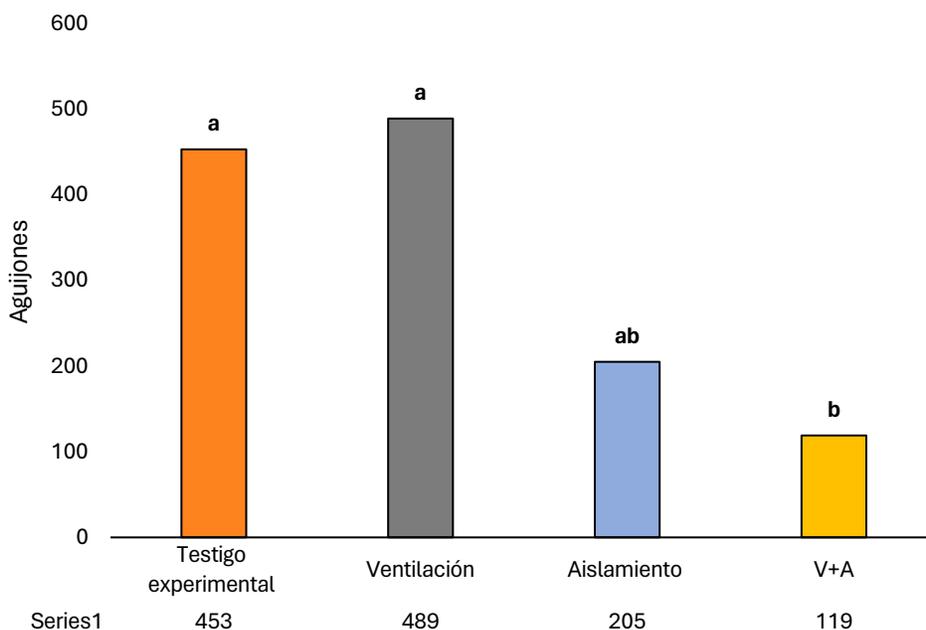
El aumento en el número de obreras adultas está directamente relacionado con el área de cría, lo que es consistente con la biología reportada en abejas melíferas. Además, la cantidad de miel almacenada se vincula con el tamaño de la población de abejas, ya que las poblaciones más grandes tienen una mayor capacidad de recolectar néctar y acumular miel. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta evaluación se centró en un período y condiciones específicas, y factores como el clima, la disponibilidad de recursos y las dinámicas naturales de la colonia pueden influir en la salud de las abejas. Por lo tanto, estos resultados ofrecen una visión momentánea y no necesariamente pueden ser extrapoladas a todas las situaciones.

6.1.3. Comportamiento Defensivo

Para medir el comportamiento defensivo de las abejas se tomó como variable el número de aguijones contabilizados (Figura 34), el cual resultó significativo para los tratamientos ($P < 0.05$). El tratamiento V fue el que presentó mayor número de aguijones, promediando $489^a \pm 23$ aguijones/minuto, incluso una de las repeticiones registró 737 aguijones/minuto. TE a su vez también provocó un mayor número de aguijones en comparación al resto, con una media de

453±223. Mientras que A y V+A fueron los que presentaron el menor número con 205±102 y 119±91, respectivamente.

Si bien las condiciones microclimáticas de la colmena pueden influir en el comportamiento de las abejas, es un factor entre muchos que deben considerarse. Con estos resultados podríamos interpretar que TE y V presentaron colmenas con un mayor comportamiento defensivo debido a que fueron estas mismas las que presentaron las condiciones microclimáticas más inestables, teniendo como referencia la desviación estándar de la cinética de temperatura y HR. Por otro lado, la colmena de V+A fue la que presentó el comportamiento menos agresivo y coincide con ser el tratamiento con las condiciones internas más estables, sin embargo, el bajo comportamiento defensivo de la colmena de aislamiento no podría explicarse de esta misma manera.



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 34. Número de agujones promedio de los tratamientos en la prueba de comportamiento defensivo

La observación de que las colmenas de V y TE presentaron un comportamiento defensivo más agresivo y, al mismo tiempo, condiciones microclimáticas más inestables sugiere una posible correlación entre la agresividad y la variabilidad en el entorno interno de la colmena. Este hallazgo

plantea la hipótesis de que las abejas pueden ser más propensas a volverse agresivas cuando experimentan condiciones adversas en el interior de la colmena (Erdoğan, 2019; Southwick y Moritz., 1987). Sin embargo, es importante destacar que esta correlación no implica necesariamente una relación de causalidad directa. Otros factores, como la genética de las abejas y su historia previa, también pueden influir en su comportamiento defensivo.

Es importante recordar que el comportamiento de las abejas puede estar influenciado por múltiples variables, y este estudio proporciona un vistazo a un aspecto específico en un momento dado. Además, la alta prevalencia de abejas melíferas africanizadas en México agrega un componente genético adicional que podría estar contribuyendo a su comportamiento defensivo. Estudios previos del 2016 mencionan que esta hibridación se encuentra desde el 30 hasta el 100% de las colmenas, dependiendo directamente si el apicultor realiza el cambio de reinas constantemente (Alaniz-Gutiérrez *et al.*, 2016). Actualmente no existen datos específicos y actualizados sobre el grado de africanización de las abejas en el noroeste de México, sin embargo, debido a los resultados obtenidos es un ámbito interesante para estudio debido a las repercusiones en el manejo que se dan por la africanización de las colonias.

6.2. Evaluación bajo condiciones frías extremas

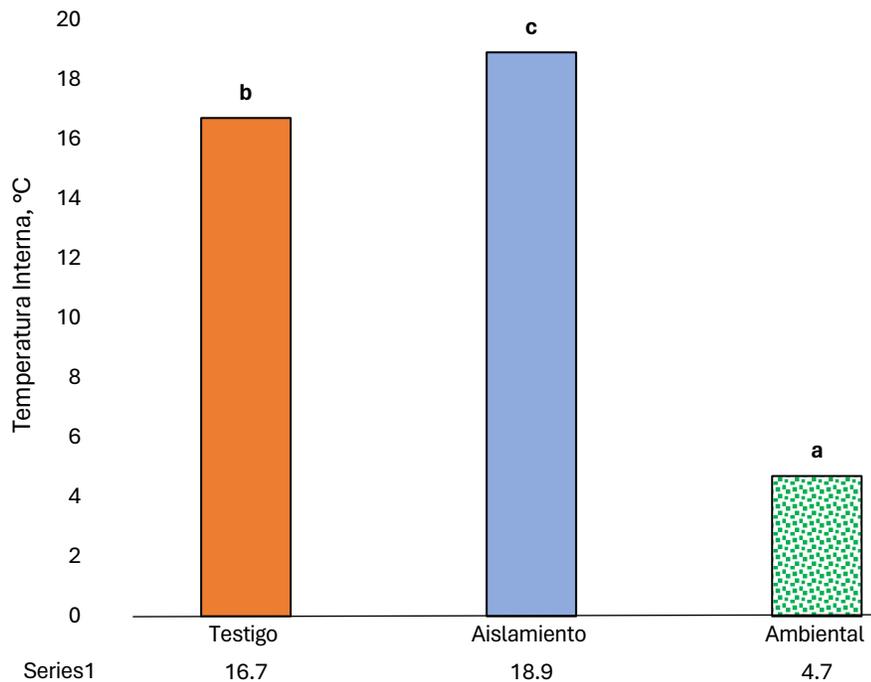
6.2.1. Cinética de temperatura y humedad relativa

Se evaluó el aumento de la temperatura interna en el tratamiento de asilamiento contra testigo. La temperatura y HR ambiental e internas de las colmenas se tomó entre las 20:00 h y 8:00 h debido a que en la noche es cuando desciende la temperatura y suelen presentarse las temperaturas más bajas del invierno. Cabe destacar que este estudio evaluó colonias en estado de hibernación en una zona donde fácilmente se alcanzan temperaturas bajo cero, la temperatura mínima para sobrevivencia de una abeja melífera es de 6°C por lo que el objetivo principal de la evaluación es crear una estrategia para disminuir la mortandad de obreras.

La evaluación dio inicio el 20 de diciembre del 2022 y finalizó el 14 de marzo del 2023. La

temporada invernal durante la evaluación tuvo una temperatura ambiental promedio general de $4.7 \pm 5.7^\circ\text{C}$, con un rango de -12.5 a 20.8°C . En el mes de diciembre se obtuvo una temperatura media ambiental de $9.4 \pm 3.8^\circ\text{C}$, enero $4.8 \pm 5.7^\circ\text{C}$, febrero resultó el más frío con un promedio de $3.0 \pm 5.4^\circ\text{C}$ y marzo de $3.0 \pm 6.3^\circ\text{C}$. La temperatura y HR ambiental siempre fueron menor en comparación con el interior de las colmenas evaluadas.

El promedio general de la temperatura interna de las colmenas resultó significativamente distinto ($P < 0.05$), en las colmenas con aislamiento fue mayor $18.9 \pm 6.5^\circ\text{C}$ en comparación con las colmenas testigo $16.7 \pm 7.4^\circ\text{C}$ (Figura 35). La cinética de temperatura resultó menos estable en la colmena testigo como se muestra en la Figura 35 presentando picos más pronunciados a lo largo de la evaluación en comparación con las colmenas de aislamiento, incluso su cinética de temperatura interna se observa sincronizada con la temperatura ambiente.



Medias que no comparten letra son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$) según la prueba de Fisher LSD

Figura 35. Temperatura interna promedio de las colmenas experimentales en temporada invernal

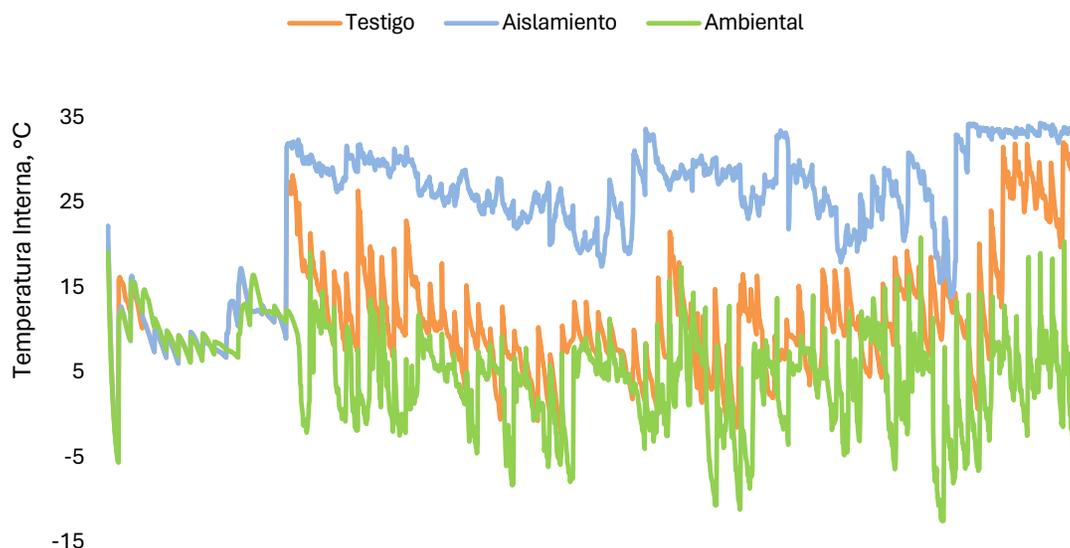
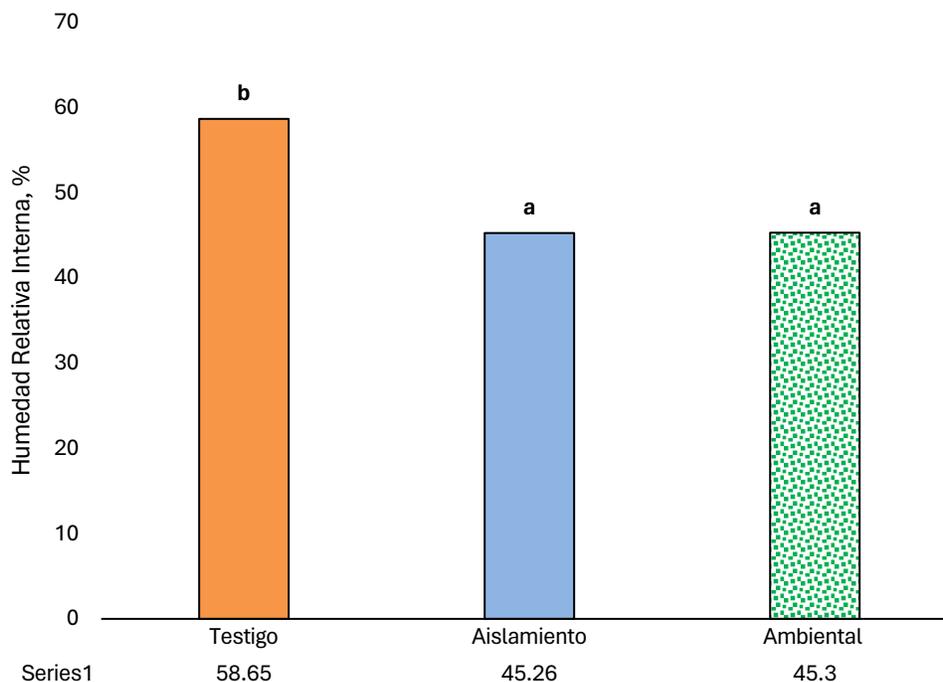


Figura 36. Cinética de temperatura interna de los tratamientos en temporada invernal durante los meses de evaluación invernal

Respecto a la humedad relativa en las colmenas testigo tuvieron significativamente una mayor HR interna ($P>0.05$) en comparación con las colmenas con aislamiento ($45.2\pm 10.4\%$) y ($58.6\pm 14.9\%$) respectivamente (Figura 37). La HR de $45.3\pm 10.4\%$ en el ambiente, resultó estadísticamente similar a la de las colmenas con aislamiento. El mayor (100%) y menor (13.1%) registro (mayor oscilación) de HR lo obtuvieron las colmenas Testigo, incluso presentando una mayor HR máxima que el registrado en el ambiente. El registro general de humedad en los tratamientos testigo y con aislamiento muestran una elevación continua en el interior como se observa en la Figura 38 a lo largo de la evaluación, sin embargo, por la desviación estándar es claro que las colmenas de madera generan una mayor variación en la HR interna.



a, b, c Medias con diferente literal, son diferentes significativamente ($P < 0.05$), según la prueba Fisher (LSD) $p > 0.05$
Figura 37. Humedad Relativa interna promedio de las colmenas experimentales en temporada invernal

Los resultados obtenidos confirman el deficiente aislamiento térmico que tienen las colmenas Langstroth convencionales en comparación con las colmenas con aislamiento debido a la higroscopicidad del material aislante (Derek Mitchell, 2019; Clair *et al.*, 2022), lo que concuerda con los estudios de Alburaki y Corona (2021) quienes evaluaron colmenas aisladas con poliuretano (10.2 °C; 52.0% HR) contra colmenas de madera (9.7°C; 62.5% HR) a una temperatura ambiente promedio de 0°C. Clair y colaboradores (2022) obtuvieron una mayor sobrevivencia (22%) en colmenas con tapa aislada comparada con colmenas con tapas sin aislar. Estos hallazgos demuestran que el factor de aislamiento es muy importante, independientemente de si se alcanzan o no temperaturas bajas extremas. Estudios previos documentan que la temperatura de las abejas en hibernación es de un promedio de 21.3 °C (Alburaki y Corona., 2021; Fahrenholz *et al.*, 1989). Los registros de HR muestran un menor porcentaje en las colmenas de aislamiento y mayor en las testigos, esto se debe a que la madera tiene una mayor capacidad de absorber la humedad y se libera a temperaturas altas, lo cual podría ser el motivo de que la colmena testigo obtuvo el valor máximo de temperatura en comparación aislamiento y el ambiente.

Un buen aislamiento en la colmena desempeña un papel de alta importancia para minimizar la

cantidad de energía requerida para termorregular en la colmena, así como disminuir la cantidad de consumo de miel (Clair *et al.*, 2022; Floris *et al.*, 2020; Keller *et al.*, 2005), ya que si las reservas se agotan causan inanición y muerte de la colonia. Este estudio demostró una pequeña mejora para las prácticas que se llevan a cabo durante el invierno con temperaturas bajas extremas, lo que contribuye a la reducción de la tasa de mortandad invernal.

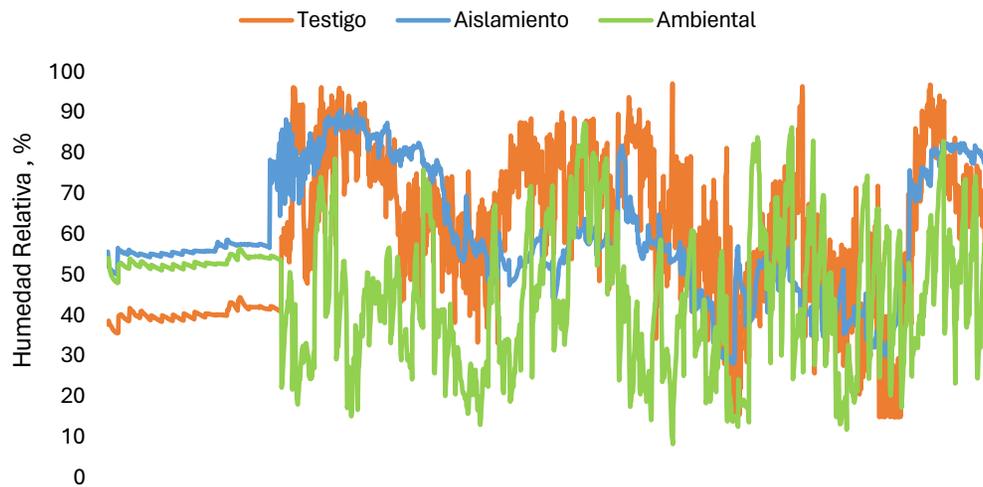


Figura 38. Cinética de humedad relativa (%) interna de los tratamientos en temporada invernal durante los meses de diciembre a marzo en el Altiplano Chihuahuense.

7. CONCLUSIONES

Referente a la evaluación en condiciones cálidas extremas, en conclusión, este estudio proporciona una evaluación detallada de la respuesta de las colonias de abejas melíferas a distintos tratamientos diseñados para enfrentar condiciones climáticas con temperaturas extremas, particularmente en entornos cálidos-áridos y fríos-secos. Los resultados arrojan importantes hallazgos que tienen implicaciones significativas para la apicultura y la conservación de las abejas en dichas condiciones ambientales.

Se demostró que la combinación V+A emergió como el tratamiento más efectivo para mantener condiciones microclimáticas óptimas en las colmenas. Esta sinergia se presenta como una solución práctica para los apicultores en regiones cálidas y áridas, siempre y cuando se consideran los desafíos asociados, como la inversión inicial y la durabilidad del aislamiento. Por otro lado, el tratamiento V también demostró ser efectivo presentando los promedios de temperatura y humedad relativa dentro de los rangos óptimos, siendo una opción más viable en términos de practicidad debido a que se requiere de un solo complemento.

En cuanto a la estimación de la fuerza de la colonia, estos mismos tratamientos resultaron en colonias más fuertes, en términos de población de abejas adultas, área de cría y cantidad de miel almacenada. Los hallazgos sugieren que el microclima estable y adecuado promovido por la ventilación tiene un impacto positivo en el desarrollo y la salud de la colonia. Por último, en términos de comportamiento defensivo, las colonias V+A respondieron con un menor comportamiento defensivo menos agresivo. Esto es un indicador positivo, ya que un comportamiento defensivo excesivamente agresivo representa un desafío para los apicultores, la seguridad de las mismas abejas y un riesgo para animales y personas en los alrededores del apiario. En resumen, este estudio destaca la importancia de considerar complementos para ayudar a mantener el microclima de las colmenas más estable y apoyar a las abejas en la labor de termorregulación para disminuir el estrés térmico en condiciones climáticas extremas en la apicultura. La implementación de complementos de aislamiento y ventilación representa una solución efectiva para mantener condiciones óptimas en entornos cálidos y áridos. Sin embargo, es fundamental que los apicultores consideren factores económicos como el costo de los materiales y de su colocación; así como prácticos, por las implicaciones en el manejo mismo de las colmenas.

Este estudio proporciona información valiosa para mejorar las prácticas de manejo y conservación de las abejas melíferas en condiciones climáticas desafiantes.

Por otro lado, basado en los resultados de la sección evaluación bajo condiciones frías extremas, se puede concluir que el aislamiento térmico desempeña un papel crítico en el bienestar de las colonias de abejas durante el invierno en entornos fríos. Esto es particularmente importante en zonas donde las temperaturas invernales descienden por debajo de los 6°C, el umbral mínimo de supervivencia para las abejas melíferas.

El estudio demostró que las colmenas aisladas con placas de poliestireno generaron una menor variabilidad en la humedad interna y un rango de temperatura cercano al requerido en la cámara de cría, con lo cual se optimiza el esfuerzo de la colonia por mantener las condiciones de la cámara de cría, lo que se traduce en un menor gasto energético. Estos hallazgos son muy relevantes para la apicultura, ya que ofrecen perspectivas sobre cómo mejorar las prácticas de manejo de colmenas en entornos fríos y extremos, lo que puede resultar en una reducción significativa de la mortalidad invernal.

8. RECOMENDACIONES

Dada la necesidad actual de abordar la pérdida de colonias de *Apis mellifera*, se hace evidente la importancia de explorar alternativas efectivas para reducir el estrés térmico causado por temperaturas extremas. Los desafíos presentados por diversos factores que actúan en sinergia, así como el cambio climático han generado una tendencia al alza en la pérdida de colonias en todo el mundo. Este estudio ha contribuido significativamente al conocimiento al ofrecer soluciones para preservar el microclima en colmenas sometidas a estrés térmico debido a condiciones extremadamente áridas-secas y frías-secas, aunque se ha enfocado en una zona geográfica, temporada, condiciones climáticas y raza de abejas específicas.

Recomendamos ampliar este estudio en varios aspectos. En primer lugar, se sugiere prolongar la duración del estudio, especialmente para evaluar el comportamiento de las colonias en las variables de fuerza de la colonia y pruebas de comportamiento defensivo en condiciones de temperaturas extremadamente frías. En segundo lugar, se considera importante aumentar el número de unidades experimentales en futuras investigaciones, lo cual requiere de un financiamiento específico. Un mayor número de unidades experimentales reducirá el margen de error y proporcionará resultados más sólidos y extrapolables. Por otro lado, aunque no se planteó como un objetivo específico, los resultados soportan la recomendación de cambiar las reinas con la frecuencia necesaria para ralentizar la hibridación con genes africanizados.

Estas recomendaciones buscan enriquecer la calidad y aplicabilidad de este estudio, lo que a su vez contribuirá a un mayor entendimiento y a la preservación efectiva de las colonias de abejas en un contexto de temperaturas extremas.

9. REFERENCIAS

- Abou-Shaara H. F., Owayss A. A., Ibrahim, Y.Y., Basuny, N.K. (2017). A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. *Insectes Sociaux*, 64(4), pp. 455–463. <https://doi.org/10.1007/s00040-017-0573-8>
- Abou-Shaara H.F., Al-Ghamdi A.A., Mohamed A.A. (2013). Honey bee colonies performance enhance by newly modified beehives. *Journal of Apicultural Science*, 57(2), pp. 45–57. <https://doi.org/10.2478/jas-2013-0016>
- Alaniz-Gutiérrez, Torres-Salado, Ail-Catzim, Velazco-López. (2016). Frecuencia de morfotipos africanizados y europeos de *Apis mellifera* en Ensenada y Mexicali, Baja California. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 3(9), pp. 421–426. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358646832015>
- Alattal, Y., Alghamdi, A. (2015). Impact of temperature extremes on survival of indigenous and exotic honey bee subspecies, *Apis mellifera* under desert and semiarid climates. *Bulletin of Insectology*. 68(2), pp. 219–222. <http://www.bulletinofinsectology.org/pdfarticles/vol68-2015-219-222alattal.pdf>
- Alburaki M., Corona M. (2021). Polyurethane honey bee hives provide better winter insulation than wooden hives. *Journal of Apicultural Research*, 61(2), pp. 190–196. <https://doi.org/10.1080/00218839.2021.1999578>
- Al-Kahtani S. N. (2003) Ecological studies on some activities of honeybee colonies under Al-Hassa Dis-trict conditions Kingdom of Saudi Arabia. *MSc The-sis*. King Faisal University. Al-Hassa. Saudi Arabia. pp. 191
- Brodtschneider R., Gray A., Adjlane N., Ballis A., Brusbardis V., Charrière J. D., Chlebo R., Coffey M. F., C de Graaf B. D., Dražić M. M., Evans G., Fedoriak M., Forsythe I., Gregorc A., Grzęda U., Hetzroni A., Kauko L., Kristiansen P., Martikkala M., Hernández R. M., Medina-Flores C. A., Mutinelli F., Raudmets A., Ryzhikov V. A., Delso N. S., Stevanovic J., Uzunov A., Vejsnæs F., Wöhl S., Zammit-Mangion M., Danihlík J. 2018. Multi-country loss rates of honey bee colonies during winter 2016/2017 from the COLOSS survey. *Journal of Apicultural Research* 57(3): 452-457. <https://doi.org/10.1080/00218839.2018.1460911>
- Clair A. L., Beach N. J., Dolezal, A. G. (2022). Honey bee hive covers reduce food consumption and colony mortality during overwintering. *PLoS ONE*. 17(4): e0266219. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0266219>
- Cook D., Blackler A., McGree J., Hauxwell C. (2021). Thermal Impacts of Apicultural Practice and Products on the Honey Bee Colony. *Journal of Economic Entomology*. 114(2), pp. 538–546. <https://doi.org/10.1093/jee/toab023>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Temperatura Máxima Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2021. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMAX/2021.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2021). Temperatura Mínima Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2021.

<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Pron%C3%B3stico%20clim%C3%A1tico/Temperatura%20y%20Lluvia/TMIN/2021.pdf>

- Cousin P., Căuia E., Sicean A., J. de Cledat (2019). The development of an efficient system to monitor the honeybee colonies depopulations. *Cumbre Global de IoT (GIoTS)*. 2019, pp. 1-5, [doi: 10.1109/GIOTS.2019.8766435](https://doi.org/10.1109/GIOTS.2019.8766435)
- Dainat B., Dieteman V., Imdorf A., Charrière J. D. (2020). A scientific note on the “Liebefeld Method” to estimate honey bee colony strength: its history, use, and translation. *Apidologie*. 51 pp. 422–427. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3341580>
- Decourtye A., Alaux C., Le Conte Y., Henry M. (2019). Toward the protection of bees and pollination under global change: present and future perspectives in a challenging applied science. *Current Opinion in Insect Science*. Vol. 35, pp. 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2019.07.008>
- Delaplane K. S., Van Der Steen J., Guzman-Novoa (2013). Standard methods for estimating strength parameters of *Apis mellifera* colonies. *Journal of Apicultural Research*. 52(1) pp. 1-12. <https://doi.org/10.3896/IBRA.1.52.1.03>
- Döke M. A., Frazier M., Grozinger, C. M. (2015). Overwintering honey bees: biology and management. *Current Opinion in Insect Science*. Vol. 10, pp. 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2015.05.014>
- Ellis M. B., Nicolson S. W., Crewe R. M., Dietemann V. (2008). Hygropreference and brood care in the honeybee (*Apis mellifera*). *Journal of Insect Physiology*. 54(12) pp. 1516–1521. <https://doi.org/10.1016/J.JINSPHYS.2008.08.011>
- Eouzan I., Garnery L., Pinto M. A., Delalande D., Neves C. J., Fabre F., Lesobre J., Houte S., Estonba A., Montes I., Sime-Ngando T., Biron, D. G. (2019). Hygroregulation, a key ability for eusocial insects: Native Western European honeybees as a case study. *PLoS ONE*. 14(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200048>
- Erdoğan Y. (2019). Comparison of colony performances of honeybee (*Apis mellifera L.*) housed in hives made of different materials. *Italian Journal of Animal Science*. 18(1) pp. 934–940. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2019.1604088>
- Fahrenholz L., Lamprecht I., Schrickler B. (1989). Journal of Comparative Thermal investigations of a honey bee colony: thermoregulation of the hive during summer and winter and heat production of members of different bee castes. *Journal of Comp Physiol B*. 159: pp. 551-560. [DOI: 10.1007/BF00694379](https://doi.org/10.1007/BF00694379).
- Farrar C. L. (1937). The influence of colony populations on honey production. *Journal of Agricultural Research*. 54 (12) pp. 941-954. <https://projects.sare.org/wp-content/uploads/1937-CL-Farrar-Article.pdf>
- Floris I., Pusceddu M., Raccimolo E., Casula A., Patteri 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. *Annals of Silvicultural Research*, 45(1) pp. 99–104. <https://doi.org/10.12899/asr-2116>
- García J. B., Iván F., Cuevas H. (2020). Apicultura: Su contribución al ingreso de los hogares rurales del sur de Yucatán. *SciELO*. 15(2), pp. 9-29. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-57662020000200009

- Gray A., Adjlane N., Arab A., Ballis A., Brusbardis V., Charrière J. D., Chlebo R., Coffey M. F., Cornelissen B., Amaro da Costa C., Dahle B., Danihlík J., Dražić M. M., Evans G., Fedoriak M., Forsythe I., Gajda A., de Graaf D. C., Gregorc A., Brodschneider R. (2020). Honey bee colony winter loss rates for 35 countries participating in the COLOSS survey for winter 2018–2019, and the effects of a new queen on the risk of colony winter loss. *Journal of Apicultural Research*, 59(5) pp. 744–751. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1797272>
- Groh C., Rgen Tautz J., Rö W. (2004). Synaptic organization in the adult honey bee brain is influenced by brood-temperature control during pupal development. *PNAS*. 101(12) pp. 4268–4273. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0400773101
- Heinrich B. (1980). Mechanisms of body-temperature regulation in honeybees, *Apis mellifera*: Regulation of thoracic temperature at high air temperatures. *J. exp. Biol.* 85(1) pp. 61-72. <https://doi.org/10.1242/jeb.85.1.61J>
- IEEE Control Systems Society. Chapter Malaysia, & Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems: proceedings: 29th June 2019, Shah Alam, Malaysia: Conference venue, Grand Blue Wave Hotel, Selangor, Malaysia
- Imdorf A., Buehlmann G., Gerig L., Kilchenmann V., Wille, H. (1987). Examination of the method for estimating the brood area and number of worker bees in free-flying bee colonies. *Apidologie*. 18(2), pp. 137–146. <https://doi.org/10.1051/apido:19870204>
- Imdorf A., Ruoff K., Fluri P. (2010). Le développement des colonies chez l’abeille mellifère. *Agroscope Liebefeld Posieux* 68, 1 pp. 67. https://www.apiservices.biz/documents/articles-fr/le_developpement_des_colonies_abeilles_melliferes.pdf
- 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. *Future Cities and Environment*, 6(1), pp.1–8. <https://doi.org/10.5334/fce.81>
- Jones J. C., Oldroyd B. P. (2006). Nest Thermoregulation in Social Insects. *Advances in Insect Physiology*. 33 pp. 153–191. [https://doi.org/10.1016/S0065-2806\(06\)33003-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2806(06)33003-2)
- Keller I., Fluri P., Imdorf A. (2005). Pollen nutrition and colony development in honey bees - Part II. *Bee World*. 86(2), pp. 27–34. <https://doi.org/10.1080/0005772X.2005.11099650>
- Langstroth L. (1852). Langstroth Bee Hive. US9300A. <https://patents.google.com/patent/US9300A/en>
- Li X., Ma W., Shen J., Long D., Feng Y., Su W., Xu K., Du Y., Jiang Y. (2019). Tolerance and response of two honeybee species *Apis cerana* and *Apis mellifera* to high temperature and relative humidity. *PLoS ONE*. 14(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217921>
- Lorenzon R., Goncalves E., Rodriguez M., Dornelles G., Pererira J. (2004). Mortero de cemento-vermiculita: Un nuevo material para la construcción de colmenas Langstroth. *Scientia Agricola*. 61(6), pp. 573–578. <https://docplayer.es/7130234-Mortero-de-cemento-vermiculita-un-nuevo-material-para-la-construccion-de-colmenas-langstroth.html>
- Magaña Magaña M. A., Tavera Cortés M. E., Salazar Barrientos L. L., Sanginés García J. R. (2016). Productividad de la apicultura en México y su impacto sobre la rentabilidad. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 7 (5), pp. 1103-1115.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i5.235>

- Marshall K. E., Gotthard K., Williams C. M. (2020). Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science*. 41(1), pp. 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2020.06.003>
- McAfee A., Chapman A., Higo H., Underwood R., Milone J., Foster L. J., Guarna M. M., Tarpay D. R., Pettis J. S. (2020). Vulnerability of honey bee queens to heat-induced loss of fertility. *Nature Sustainability*, 3(5), pp. 367–376. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0493-x>
- Medina-Flores C. A., Esquivel-Marín N. H., López-Carlos M., Medina-Cuellar S. E., Aguilera-Soto J. I. (2018). Estimación de la pérdida de colonias de abejas melíferas en el altiplano y el norte de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 5(14), pp. 365–371. <https://doi.org/10.19136/era.a5n14.1459>
- Menzel F., Feldmeyer B. (2021). How does climate change affect social insects? *Current Opinion in Insect Science*. 46 pp. 10–15. <https://doi.org/10.1016/j.cois.2021.01.005>
- Mitchell D. (2015). Ratios of colony mass to thermal conductance of tree and man-made nest enclosures of *Apis mellifera*: Implications for survival, clustering, humidity regulation and *Varroa destructor*. *International Journal of Biometeorology*. 60(5), pp- 629–638. [doi:10.1007/s00484-015-1057-z](https://doi.org/10.1007/s00484-015-1057-z)
- Mitchell D. (2019). To save honey bees we need to design them new hives. *The Conversation: Academic rigour, journalistic flair*. United Kingdom. <https://theconversation.com/to-save-honey-bees-we-need-to-design-them-new-hives-121792>
- Monchanin C., Henry M., Decourtye A., Dalmon A., Fortini D., Bœuf E., Dubuisson L., Aupinel P., Chevallereau C., Petit J & Fourrier J. (2019). Hazard of a neonicotinoid insecticide on the homing flight of the honeybee depends on climatic conditions and *Varroa* infestation. *Chemosphere*. Vol. 224 pp. 360-368. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.129>
- Nasr M. E., Thorp R. W., Tyler T. L., Briggs, D. L. (1990). Estimating Honey Bee (Hymenoptera: Apidae) Colony Strength by a Simple Method: Measuring Cluster Size. *J. Econ. Entomol.* 83(3), pp. 748–754. <https://doi.org/10.1093/jee/83.3.748>
- Ohashi M., Okada R., Kimura T., Ikeno H. (2008). Control of hive environment by honeybee (*Apis mellifera*) in Japan. *Proceedings of Measuring Behavior. Methods and Techniques. Behavioral Research*. 41(3), pp. 782-786. DOI: [10.3758/BRM.41.3.782](https://doi.org/10.3758/BRM.41.3.782)
- Peters J. M., Peleg O., Mahadevan L. (2019). Collective ventilation in honeybee nests. *Journal of the Royal Society Interface*. 16:20180561 <https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0561>
- Preston S. R., Palmer J. H., Harrison J. W., Carr H. M., Rittschof C. C. (2019). The impacts of maternal stress on worker phenotypes in the honey bee. *Apidologie* 50(5): pp. 704–719. <https://doi.org/10.1007/s13592-019-00680-1>
- Purdue Extension 2017. The Complex Life of the Honey Bee [Online]. Purdue University. Available: <https://ag.purdue.edu/department/extension/ppp/resources/ppp-publications/the-complexlife-of-the-honey-bee/>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2020). La apicultura en México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-apicultura-en-mexico?idiom=es>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). Crecen producción y exportaciones de miel en México al cierre de 2021: Agricultura. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/crecen>

[produccion-y-exportaciones-de-miel-en-mexico-al-cierre-de-2021-agricultura-293944?idiom=es#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20el%20novo%20productor,d%C3%B3lares%20durante%20el%20a%C3%B1o%20pasado](#)

- Sosenski P., Domínguez C. A. (2018). The value and risks of pollination as an ecosystem service. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 89(3), pp. 961–970. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2018.3.2168>
- Southwick E. E., Moritz R. F. (1987). Effects of meteorological factors on defensive behaviour of honey bees. *Int. J. Biometeor.* 31(3), pp. 259-265.
- Southwick E.E., Heldmaier G. (1987). Temperature Control in Honey Bee Colonies. *BioScience*. 37:395. <https://doi.org/10.2307/1310562>
- Stabentheine A., Pressl H., Papst T., Hrassnigg N., Crailsheim K. (2003). Endothermic heat production in honeybee winter clusters. *Journal of Experimental Biology*, 206(2) pp. 353–358. <https://doi.org/10.1242/jeb.00082>
- Stabentheiner, A., Kovac, H., Brodschneider, R. (2010). Honeybee colony thermoregulation - Regulatory mechanisms and contribution of individuals in dependence on age, location and thermal stress. *PLoS ONE*. 5(1): e8967. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0008967>
- Steinhauer N., vanEngelsdorp D., Saegerman C. (2021). Prioritizing changes in management practices associated with reduced winter honey bee colony losses for US beekeepers. *Science of the Total Environment*, 753. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141629>
- Stort C. A. (1974). Genetic Study of Aggressiveness of two Subspecies of *Apis Mellifera* in Brazil 1. Some Tests to Measure Aggressiveness, *Journal of Apicultural Research*, 13:1, pp. 33-38, DOI: [10.1080/00218839.1974.11099756](https://doi.org/10.1080/00218839.1974.11099756)
- Stürup M., Baer-Imhoof B., Nash D. R., Boomsma J. J., Baer B. (2013). When every sperm counts: Factors affecting male fertility in the honeybee *Apis mellifera*. *Behavioral Ecology*. 24(5) pp. 1192–1198. <https://doi.org/10.1093/beheco/art049>
- Tautz R., Maier S., Groh C., Rö W., Brockmann, A. (2003). Behavioral performance in adult honey bees is influenced by the temperature experienced during their pupal development. *PNAS*. 100(12): pp. 7343–7347. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1232346100
- Wang Q., Xu X., Zhu X., Chen L., Zhou S., Huang Z. Y., Zhou, B. (2016). Low-temperature stress during capped brood stage increases pupal mortality, misorientation and adult mortality in honey bees. *PLoS ONE*. 11(5): e0154547 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154547>
- Wolfslehner B., Prokofieva I., Mavsar R. (2019). Non-wood forest products in Europe seeing the forest around the trees. Instituto Forestal Europeo. <https://efi.int/publications-bank/non-wood-forest-products-europe-seeing-forest-around-trees>
- Zacepins A., Brusbardis V., Meitalovs J., Stalidzans E. (2015). Challenges in the development of Precision Beekeeping. *Biosystems Engineering*. 130(1), pp. 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.12.001>
- Zeaiter Z., Myerscough M. R. (2020). Poor hive thermoregulation produces an Allee effect and leads to colony collapse. *Journal of Theoretical Biology*, 503, 110361. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2020.110361>