



**UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

**Evaluación del ambiente interno de una nave avícola para
gallinas ponedoras comerciales**

Trabajo Final de Graduación presentado a la Facultad de Ingeniería
como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola

Diego Miguel Brian Carazo

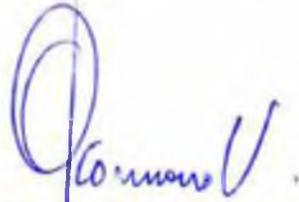
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2018

APROBACIÓN

Este trabajo final de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica, como requisito para optar al grado y título de Licenciatura en Ingeniería Agrícola.



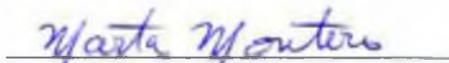
Ing. Giovanni Carmona Villalobos
Director del Trabajo Final de Graduación



MSc. Juan Gabriel Monge Gapper
Miembro, Equipo Asesor



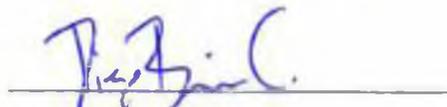
Dra. Rebeca Zamora Sanabria
Miembro, Equipo Asesor



Dra. Marta Montero Calderón
Miembro, Tribunal Examinador



Msc. Marianela Alfaro Santamaria
Miembro, Tribunal Examinador



Diego Miguel Brian Carazo
Estudiante

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

A Dios y a la Santísima Virgen María, por ser mis guías, por ayudarme y bendecirme tanto a lo largo de toda mi vida.

A mi mamá Ana Leonor, a mi papá Hugo y a mis hermanos Mauricio y Ricardo, por su inmenso amor, cariño y apoyo incondicional.

Al profesor Geovanni Carmona, por todos sus valiosos consejos y su dedicación en este trabajo. Todos sus aportes fueron fundamentales para que este proyecto se llevara a cabo.

A mis lectores doña Rebeca y don Juan Gabriel, por sus importantes contribuciones y orientación en este trabajo.

A la empresa avícola, por su confianza y su esfuerzo económico para poder desarrollar este proyecto.

Al profesor Carlos Rojas, por su valioso aporte en el modelo estadístico.

Al profesor Hongwei Xin de la Universidad de Iowa State por su contribución en la metodología.

A la Escuela de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas por la educación recibida y por formarme como profesional.

A todos mis amigos y compañeros por todas las experiencias vividas a lo largo de estos años.

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
RESUMEN	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Justificación del proyecto.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Variables que afectan las condiciones internas	4
2.2 Funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo	8
2.3 Estrés por calor en las aves.....	10
2.4 Funcionamiento de un ventilador.....	13
2.5 Sistemas tipo túnel y ventilación natural.....	15
2.6 Otros factores que intervienen en las condiciones internas.....	18
3. METODOLOGÍA.....	20
3.1 Ubicación geográfica y descripción de la zona de estudio.....	20
3.2 Medición de la temperatura y humedad relativa	24
3.3 Medición de la velocidad del aire.....	24
3.4 Medición de la concentración de dióxido de carbono (CO ₂)	25
3.5 Medición del nivel de iluminación o iluminancia	26

3.6	Medición de la velocidad promedio de los ventiladores	28
3.6.1	Interpretación de los resultados de ventilación.....	30
3.6.2	Estimación de la presión estática de los ventiladores	31
3.7	Evaluación del sistema de enfriamiento evaporativo	32
3.8	Medición de las temperaturas instantáneas en el interior de las jaulas	34
3.9	Tratamiento estadístico.....	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1	Variables ambientales.....	37
4.2	Modelo estadístico.....	42
4.2.1	Confiabilidad de los datos	42
4.2.2	Validez de los datos.....	44
4.2.3	Análisis de conglomerados	46
4.3	Ventilación natural y ventilación forzada	48
4.4	Imágenes de la cámara termográfica	54
4.5	Ventilación	56
4.6	Eficiencia del sistema de enfriamiento.....	61
4.7	Distancias mínimas con obstrucciones.....	64
5.	CONCLUSIONES	66
6.	RECOMENDACIONES	68
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
8.	ANEXOS.....	84
8.1	Muestra de cálculo.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo
- Figura 2.** Zona termoneutral de un ave
- Figura 3.** Funcionamiento de la ventilación tipo túnel
- Figura 4.** Vista aérea de la nave avícola en estudio
- Figura 5.** Vista interna de la instalación
- Figura 6.** Paneles del sistema de enfriamiento evaporativo
- Figura 7.** Ventiladores colocados en el fondo de la nave
- Figura 8.** Posiciones de medición para todas las variables
- Figura 9.** Localización de los puntos de medición de velocidad en el ventilador
- Figura 10.** Visualización de los ventiladores y sus debidas posiciones
- Figura 11.** Posiciones de los sensores de temperatura y humedad relativa en los paneles del sistema de enfriamiento
- Figura 12.** Análisis de conglomerados para cada posición
- Figura 13.** Imagen captada a una jaula con la cámara termográfica con unidades de temperatura en grados Fahrenheit
- Figura 14.** Fotografía de una jaula con la cámara termográfica con unidades de temperatura en grados Fahrenheit
- Figura 15.** Suciedad en las persianas del ventilador
- Figura 16.** Zonas secas en el panel de enfriamiento
- Figura 17.** Suciedad en el sistema de enfriamiento
- Figura 18.** Fugas de aire en la instalación
- Figura 19.** Velocidades de los diferentes ventiladores para cada posición en metros por segundo
- Figura 20.** Cálculo de la eficiencia del sistema de enfriamiento para un panel

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estándares establecidos para la raza Isa Brown

Cuadro 2. Mediciones de temperatura para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Cuadro 3. Mediciones de humedad relativa para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Cuadro 4. Mediciones de concentración de CO₂ para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Cuadro 5. Mediciones de velocidad del viento con diez ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Cuadro 6. Mediciones de velocidad del viento con ocho ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Cuadro 7. Mediciones de velocidad del viento con seis ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Cuadro 8. Mediciones de iluminancia medidos de forma puntual

Cuadro 9. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la temperatura

Cuadro 10. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la humedad relativa

Cuadro 11. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la concentración de CO₂

Cuadro 12. Porcentaje de datos adentro de las recomendaciones para cada variable durante los dos meses de estudio

Cuadro 13. Promedios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ durante la ventilación forzada suministrada de 6:00 a.m. a 5:00 p.m.

Cuadro 14. Promedios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ durante la ventilación natural suministrada de 5:00 p.m. a 6:00 a.m.

Cuadro 15. Datos de temperatura bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Cuadro 16. Datos de humedad relativa bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Cuadro 17. Datos de concentración de CO₂ bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Cuadro 18. Datos de temperatura bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Cuadro 19. Datos de humedad relativa bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Cuadro 20. Datos de concentración de CO₂ bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Cuadro 21. Presiones estáticas calculadas a partir del ventilador marca Multifan

Cuadro 22. Presiones estáticas calculadas a partir del ventilador marca Big Dutchman

Cuadro 23. Valores promedios de temperatura y humedad relativa para el cálculo de la eficiencia del sistema de enfriamiento

Cuadro 24. Valores promedios de temperatura y humedad relativa para las posiciones externas y las posiciones de cada panel de enfriamiento

Cuadro 25. Eficiencias de los paneles de enfriamiento evaporativo

RESUMEN

Se realizó un análisis de las condiciones internas en una nave avícola, donde se midieron las variables de temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂), velocidad del viento y nivel de iluminación (o iluminancia) en distintas posiciones en el interior de la nave con el fin de determinar si cumplían con los estándares establecidos para la raza y edad de las aves. Los resultados obtenidos mostraron que la mayoría de datos de las variables antes mencionadas no se encontraron dentro del intervalo recomendado y que en ninguna posición analizada, la cantidad de datos adentro del intervalo recomendado superó el 40% para cualquier variable. Lo anterior se observó en las dos formas de operación en la nave (ventilación natural y ventilación forzada con sistema de enfriamiento evaporativo).

Mediante un análisis de conglomerados, se observó que dentro de la nave se presentaron zonas donde las condiciones ambientales fueron diferentes entre sí.

Se analizó la eficiencia del sistema de enfriamiento evaporativo para cada panel, registrando datos de temperatura y humedad relativa. Mediante el uso de estos datos y de la carta psicrométrica, se determinó que las eficiencias variaron entre 73% y 90%.

La medición de los caudales de algunos ventiladores mostró que fueron menores a los esperados y esto se debió a la alta presión estática a la que estaban trabajando. Se compararon los caudales obtenidos con las pruebas de diferentes ventiladores similares

registrados en el laboratorio BESS y se logró estimar que los ventiladores estaban trabajando contra una presión estática de aproximadamente 0,075 kPa (0,30" de H₂O).

Todo lo anterior ayudó a comprobar que los resultados obtenidos fueron diferentes a las recomendaciones ambientales para las aves. Finalmente, se realizaron recomendaciones a la empresa propietaria de la nave avícola con el fin de mejorar la situación actual.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación del proyecto

La producción de huevos representa una actividad muy importante para el país, tanto a nivel económico como a nivel nutricional. Este alimento representa una valiosa fuente de energía, ya que contiene proteína, vitaminas y minerales. Además, el consumo de huevo favorece la reparación muscular, mejora la visión, permite mantener un buen estado del sistema nervioso y ayuda en la formación de huesos y dientes [1].

De acuerdo con datos de la Cámara Nacional de Avicultores (CANAVI) cada costarricense consume en promedio un poco más de 200 huevos al año, y a finales del año 2015 se producían alrededor de 2.650.000 huevos diarios en todo el territorio nacional. [1]. Este consumo tiene una tendencia de ir aumentando a través de los años, por lo que aunado al aumento en la población, es necesario que la producción de huevos también siga este camino.

Debido a que las aves viven toda su vida adentro de una nave avícola, es necesario otorgarles las condiciones ambientales adecuadas, además de un buen trato y una buena alimentación. Es necesario buscar que la producción de huevos no se vea alterada de forma negativa, permitiéndoles a las aves crecer y desarrollarse en un ambiente adecuado y en un lugar limpio. Por lo tanto, el estudio de las variables que afectan las condiciones ambientales adentro de este tipo de inmuebles resulta muy importante.

Uno de los elementos que perjudican a los animales y a la producción de huevos es el estrés por calor. El estrés por calor en las aves sucede cuando los animales tienen dificultades para obtener un balance entre la producción corporal de calor y la pérdida corporal del calor [2]. Esto puede ocurrir a cualquier edad y para cualquier tipo de raza [2]. Las diferentes causas de exceso de calor en el interior de una nave avícola incluyen la producción de calor interna del animal, la transferencia de calor que se da desde el exterior de la instalación hacia el interior de la misma, el calor producido por la iluminación, ventiladores y el personal que entra a la instalación. El estrés por calor es un problema muy serio que ha afectado a muchos productores alrededor del mundo. Se estima que debido a este inconveniente, la pérdida anual en Estados Unidos en la industria de la ganadería fue de \$1,69 a \$2,36 billones, de los cuales de \$128 a \$165 millones corresponden a la industria avícola [3] [citado en (4 pE73)].

Actualmente en Costa Rica existe poca información disponible sobre las condiciones ambientales presentes en naves avícolas. Estas condiciones ambientales es uno de los retos más importantes a tomar en cuenta en la producción avícola [5]. Es así como surge la necesidad de examinar más a fondo los parámetros más importantes que afectan las condiciones internas en este tipo de instalaciones y cómo estas condiciones repercuten en las aves. El presente proyecto tiene como fin analizar el clima adentro de una nave avícola de gallinas ponedoras comerciales, para determinar si cumple con las condiciones básicas que requieren las aves para su comodidad y con base en el análisis, mencionar recomendaciones que la empresa puede adoptar para mejorar la situación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar las condiciones ambientales y la circulación del aire en un recinto avícola de gallinas ponedoras comerciales.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar las condiciones ambientales en la instalación mediante la medición de las variables que sean influyentes a la condición de estrés por calor de las aves.
2. Valorar el rendimiento del sistema de enfriamiento evaporativo existente ante diferentes escenarios de condiciones de tiempo climatológico.
3. Establecer la relación existente entre las variables ambientales y las ubicaciones analizadas en el interior de la nave.

2. MARCO TEÓRICO

El clima dentro de las naves avícolas influye en muchos aspectos, incluyendo la producción y la salud de las aves. Existen algunos factores que afectan directamente en las condiciones internas de una nave y que pueden provocar inconvenientes en los animales. Cierta tipo de problemas, tales como trastornos respiratorios, digestivos y de comportamiento son más probables que ocurran en lugares en los cuales las condiciones climáticas no son las adecuadas [6].

2.1 Variables que afectan las condiciones internas

Una de las variables que más afecta a los animales es la temperatura. La temperatura dentro de una nave avícola depende de diversos factores, los cuales se pueden resumir en: la radiación del sol, la temperatura corporal de los animales, la calefacción artificial, el calor de fermentación del estiércol y los materiales de construcción que tienen incidencia en la transferencia de calor [6]. Si la temperatura adentro de la nave es muy baja, las aves tienen que consumir más alimento y tienen que utilizar más energía para poder mantener su cuerpo caliente. Por el contrario, si la temperatura es muy alta, las aves reducen el consumo de alimento para limitar la producción de calor [7]. Cuando las temperaturas en el interior están entre 24-30 °C, lo recomendable es utilizar un sistema de ventilación forzada [7].

La temperatura y la humedad relativa trabajan de manera conjunta. Por ejemplo, el aire caliente tiene más potencial para absorber humedad del ambiente que el aire frío. Por lo

tanto, un cambio en la temperatura del aire puede aumentar o disminuir la humedad relativa del mismo [7]. El aire frío no posee mucha humedad y generalmente es referido como “aire seco”, a pesar de que su humedad relativa es muy elevada [8]. Cuando el aire se calienta, su volumen se expande y por lo tanto, tiene más capacidad de absorber humedad [8]. Las humedades relativas más bajas tenderán a dar como resultado una instalación avícola polvorienta y con altos costos de calefacción, mientras que humedades relativas más altas pueden provocar jaulas húmedas y altas concentraciones de amoníaco [9]. Por lo tanto, es recomendable mantener la humedad relativa entre un 60% y un 70% [7]. El impacto más directo que tiene la humedad del aire en las aves es que afecta a la regulación térmica de las mismas. Bajo la condición de altas temperaturas, las aves regulan su propia temperatura del cuerpo mediante el calor evaporativo, pero la alta humedad provoca que la eliminación de calor mediante el enfriamiento por evaporación no sea eficiente [6].

Los sistemas de ventilación juegan un papel muy importante adentro de una instalación. Dentro de sus principales funciones, se pueden mencionar las siguientes:

- Suministrar aire fresco a toda hora: Durante el verano, grandes volúmenes de aire son necesarios para controlar la temperatura interna [8].
- Distribuir aire fresco uniformemente: Las entradas de aire traen aire fresco a la instalación, reduciendo la velocidad del viento y la temperatura a límites aceptables [8].
- Regular la temperatura interna: El rango de temperaturas para los cuales los animales se sienten más cómodos varía para cada raza. A pesar de que la mayoría de los

animales poseen amplios rangos de temperaturas de confort, grandes fluctuaciones de temperatura pueden crear condiciones que causen estrés y otro tipo de problemas de salud [8].

- Retirar el exceso de humedad provocado por los animales y los sistemas de enfriamiento: Todos los animales exhalan vapor mediante la respiración. Si a esto se une la humedad que se evapora de pisos mojados, el ambiente se tornaría muy húmedo si no se retira adecuadamente de la instalación. El aire húmedo absorbe fácilmente los olores y promueve un ambiente favorable para el desarrollo de microorganismos dañinos para la salud [8].

- Remover olores y gases: El ambiente que rodea a los animales acumula dióxido de carbono debido a la respiración. Amoníaco, metano y sulfuro de hidrógeno son gases que se pueden generar debido a la descomposición del estiércol. Todos estos gases tienen la capacidad de disminuir la productividad animal, causar deterioro en los equipos y otorgar condiciones de trabajo muy pobres para los encargados del lugar [8].

Todos los sistemas de ventilación operan basados en el principio de balance de calor; el calor producido por los animales debe equilibrar el calor perdido por el sistema de ventilación, con el fin de obtener un ambiente adecuado [8]. El diseño de ventilación se basa en tres principios básicos: la tasa de intercambio de aire, la distribución del aire y la velocidad del aire a nivel del animal [10]. La tasa de intercambio de aire debe garantizar un control adecuado de la temperatura interior, así como una evacuación eficaz de la humedad

y los contaminantes del aire [10]. Pueden existir algunos factores que alteran la distribución del aire y las condiciones internas, como puertas y ventanas abiertas, grietas en las paredes o el deterioro del sistema de ventilación y del sistema de enfriamiento.

La medición de la velocidad del viento en una nave avícola no es una actividad sencilla, debido a que puede llegar a ser muy variable. La velocidad del viento varía dependiendo de la construcción de la nave, el número de ventiladores en funcionamiento, la proximidad a los ventiladores del túnel o la entrada del túnel, la instalación del equipo, la presencia de las jaulas y si hay aves presentes [11]. Sin embargo, una medición de la velocidad del aire que no cambia significativamente dentro de una nave es la velocidad promedio (dentro de cualquier sección transversal de la instalación); lo que sí puede cambiar es cualquier medición individual de la velocidad del aire dentro de un perfil de velocidad del aire [11]. Por ejemplo, la velocidad del aire que se mida en el centro de la instalación a 1,5 m (5 pies) sobre el piso puede variar significativamente a medida que se mueve desde la entrada del túnel hasta los ventiladores del túnel, pero si se toman varias mediciones a través de cada perfil, no existiría cambio alguno [11].

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas incoloro, inodoro, y puede estar presente en una instalación avícola debido a la respiración animal y a la descomposición del estiércol [12]. Además, el CO_2 es considerado uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global. La toxicidad del CO_2 y sus efectos negativos aumentan con la concentración y ésta alta concentración puede existir dentro de una instalación cuando se produce un fallo de ventilación [12]. Por lo tanto, es sumamente

importante medir las concentraciones de este tipo de gases para verificar que se encuentren por debajo de los límites establecidos. Lo recomendable es mantener la concentración de dióxido de carbono por debajo de los 3500 ppm [9]. Si la concentración de dióxido de carbono es alta, la concentración de oxígeno en el aire disminuirá considerablemente, por lo que afectará la respiración y el metabolismo fisiológico de las aves [6]. También es probable que aumenten otras concentraciones de gases nocivos [6].

2.2 Funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo

Los sistemas de enfriamiento evaporativo se basan en la transferencia de calor del aire exterior hacia los paneles húmedos, produciendo una evaporación del agua y provocando una caída en la temperatura del aire [13]. Con esto, se logra una sensación agradable y fresca en el interior de la instalación.

En estos sistemas cuando el aire entra en contacto con el agua, una parte de esta agua se evapora. Esto sucede porque la temperatura y la presión de vapor del agua y del aire intentan equilibrarse [14]. Las moléculas de agua que se evaporan absorben calor de sus alrededores, provocando así una disminución en la temperatura. El calor sigue presente solo que es atrapado en forma de vapor de agua que se encuentra en el aire; a este proceso se le denomina enfriamiento adiabático [14]. Los paneles de enfriamiento se diseñan para absorber y retener agua, así como maximizar el área de contacto con el aire y el agua. Este proceso se puede ver más claro en la siguiente figura:

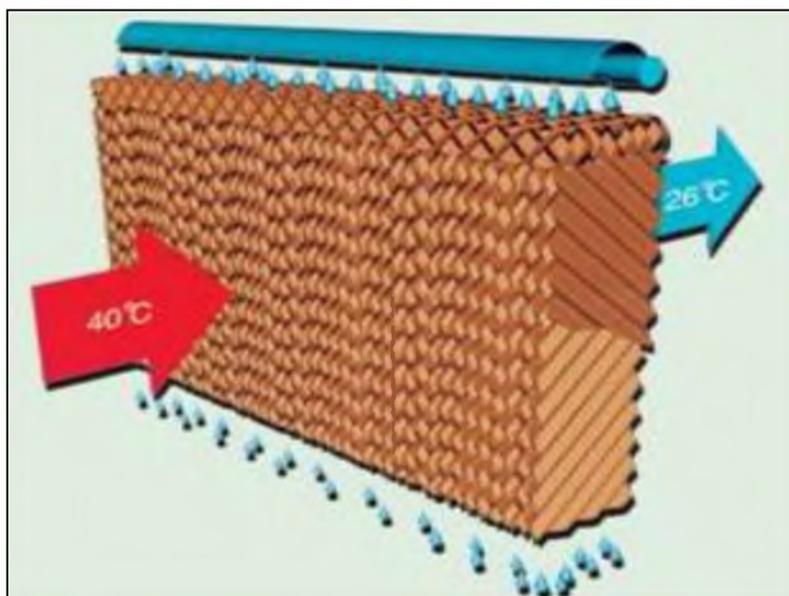


Figura 1. Funcionamiento del sistema de enfriamiento evaporativo [15]

Como se puede apreciar en la figura 1, una cascada de agua fría baja a través de los paneles con el propósito de que el aire caliente pase a través de ellos. Los paneles de evaporación consisten en un material fibroso entrelazado, similar al cartón corrugado, con espacios más grandes en las corrugaciones [8]. El agua se escurre por la corrugación a través de un canal perforado, y con la ayuda de un sistema de bombeo, se mantiene el material húmedo mientras se requiera enfriamiento [8]. Así, se logra una reducción en la temperatura del aire y un aumento de la humedad relativa.

Para poder obtener un adecuado desempeño del sistema de enfriamiento evaporativo, es necesario evaporar grandes volúmenes de agua. Además, el desempeño también depende de la cantidad de vapor de agua presente en el aire; entre más seco esté el aire, más eficiente será el sistema de enfriamiento [14]. Para determinar la cantidad de vapor de agua presente

en el aire, solamente se necesita utilizar un termómetro de mercurio de bulbo húmedo, que consiste en que el bulbo tenga un paño o algodón mojado en agua y al cual se le suministra una corriente de aire. El agua se evaporará en mayor o menor proporción, dependiendo de la humedad relativa del ambiente.

Este tipo de sistemas se pueden utilizar básicamente en cualquier lugar donde se requiera una disminución de la temperatura y donde los niveles de humedades relativas no sean muy altos (mayor a 70%). Algunas instalaciones donde se pueden requerir este tipo de sistemas incluyen las instalaciones avícolas, porcinas, ovino, vacuno y hasta en las fábricas de producción industrial [13].

2.3 Estrés por calor en las aves

El estrés por calor en las aves es un problema muy serio y es uno de los factores que afecta la producción de huevos en una nave avícola. El estrés por calor es el resultado de un balance negativo entre la cantidad neta de energía que fluye del cuerpo del animal a su entorno y la cantidad de energía térmica producida por el animal [3]. A temperaturas muy elevadas (mayores a 33 °C), es muy evidente la mortalidad en las aves y la poca producción de huevos, pero a temperaturas menos extremas (29 °C aproximadamente) generalmente se pasa por alto el estrés por calor como la causa de un mal crecimiento, el descenso en la producción de huevos y en la calidad de la cáscara [16].

Las gallinas pueden perder calor mediante 4 diferentes métodos:

- 1) Convección: Es la pérdida de calor debido a la circulación del aire frío que rodea a las aves. Ellas pueden aumentar el área de contacto con el viento si extienden las alas [11].
- 2) Radiación: Las ondas electromagnéticas transfieren el calor utilizando el aire hacia otro objeto más lejano. El calor se irradia a los objetos más fríos [11].
- 3) Enfriamiento por evaporación: Cuando las aves respiran de forma rápida, poco profunda y con la boca abierta, se aumenta la pérdida del calor corporal debido a que aumenta la evaporación del agua de la boca y del tracto respiratorio [11].
- 4) Conducción: Se da cuando el animal entra en contacto con alguna superficie de menor temperatura [11].

La zona termoneutral, la cual varía según la edad, es un rango de temperaturas en el que el ave no está utilizando energía para perder o ganar calor [17]. Las aves más jóvenes tienen poca capacidad de regular su temperatura interna y necesitan calor, conforme van creciendo, las aves amplían su zona termoneutral [7]. Generalmente este rango está comprendido entre los 18 °C y los 24 °C [7]. Lo que ocurre tanto adentro como afuera de la zona termoneutral se puede apreciar en la siguiente figura:

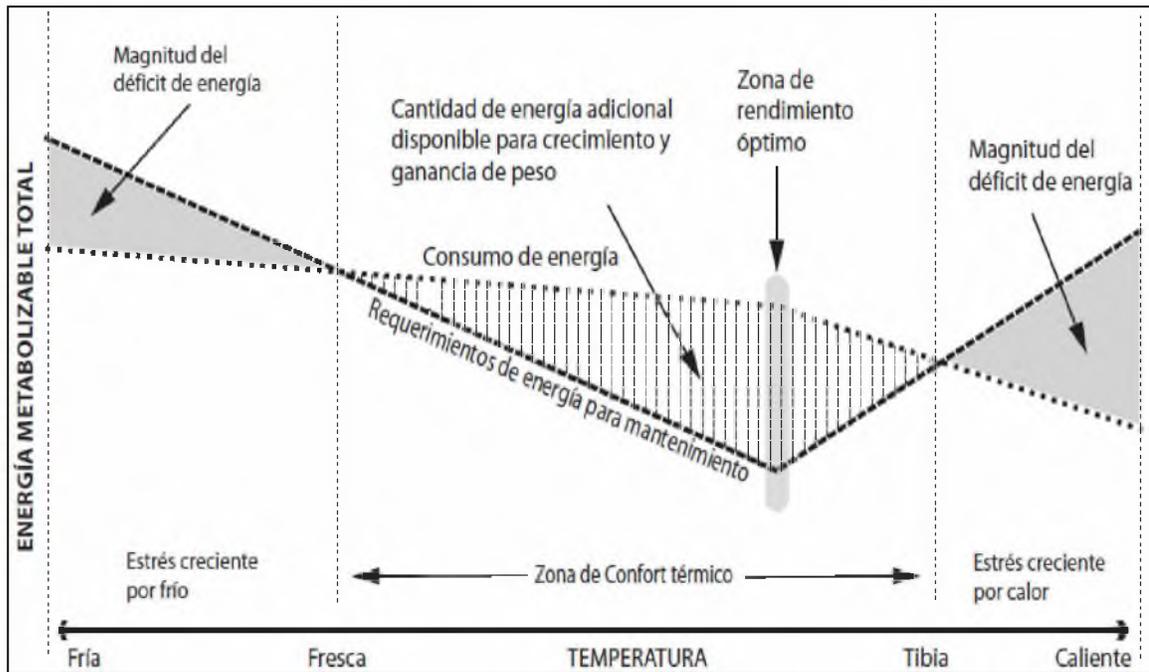


Figura 2. Zona termoneutral de un ave [7]

Como se puede observar en la figura 2, cuando la temperatura del animal se encuentra dentro de la zona termoneutral, el comportamiento es normal y la pérdida de calor sensible es la adecuada [2]. Además en la zona de rendimiento óptimo, el ave utiliza mejor la energía del alimento para crecer y desarrollarse [7]. El hecho de que las aves estén dentro de la temperatura óptima, junto con una adecuada alimentación y cantidad de agua, provocará que se logre el nivel máximo de bienestar y rendimiento económico [7]. Conforme la temperatura va aumentando, la temperatura del ave irá en ascenso, el animal comenzará a jadear, se irá cansando más rápidamente, disminuirá la cantidad de alimento ingerido y utilizará parte de su energía para tratar de perder calor [2]. Si la temperatura sigue subiendo, el ave comenzará a tener problemas de bienestar, no es capaz de controlar

su temperatura corporal y puede causarle la muerte [17]. Por el contrario, si la temperatura es menor que la zona termoneutral, el ave destinará su energía a la producción de calor en vez de su propio crecimiento [17].

2.4 Funcionamiento de un ventilador

El factor que más interesa al momento de seleccionar un ventilador es cuánto aire el ventilador es capaz de mover [8]. Los ventiladores son la fuerza impulsora detrás del intercambio de aire que es necesario para crear un ambiente saludable para los animales y los trabajadores [18]. Los ventiladores son generalmente seleccionados en función de una característica de rendimiento del ventilador que relaciona la velocidad del flujo de aire con una resistencia de diseño contra la cual opera el ventilador [19]. La presión estática es la diferencia de presión que crea un ventilador entre el interior y el exterior de una estructura ventilada mecánicamente [19]. Los ventiladores se utilizan para crear un vacío dentro de un edificio mediante la expulsión de aire [19]. En el sistema tipo túnel, los ventiladores funcionan contra 0,0025 a 0,030 kPa (0,01 a 0,12 pulgadas de H₂O) de presión estática, y generalmente se recomienda mantener baja la presión estática para maximizar la tasa de flujo de aire y la velocidad [19]. Las causas de las altas presiones estáticas adentro de las instalaciones avícolas son:

- Sistema de enfriamiento: Los paneles de enfriamiento generalmente causan una caída de presión estática bastante grande entre 0,012 kPa a 0,025 kPa (0,05- 0,10 pulgadas de agua). Con tal resistencia al flujo de aire, el aire exterior caliente fluirá a la casa a través de cualquier otra abertura menos restrictiva, como grietas o entradas [20]. A medida que los paneles de enfriamiento envejecen y acumulan polvo, algas y escamas minerales, las eficiencias inevitablemente disminuyen al menos ligeramente y las presiones estáticas aumentan al menos ligeramente, incluso si tienen un mantenimiento adecuado [21].
- Persianas: Las persianas ayudan a que cuando los ventiladores no estén en funcionamiento, la lluvia y el aire exterior no ingresen a la instalación. Sin embargo, las persianas limpias pueden crear una presión estática entre 0,005 kPa y 0,025 kPa (0,02-0,10 pulgadas de agua) y persianas sucias entre 0,012 kPa y 0,05 kPa (0,05- 0,20 pulgadas de agua) [22].
- Conducción a lo largo de la instalación: Inicialmente la presión es causada cuando el aire, que ingresa a través de las aberturas del túnel relativamente grandes, tiene que moverse hacia un área de sección transversal más pequeña de la nave. Después la presión es causada por la ligera resistencia al aire que se mueve a lo largo de la instalación [23].

Además de esto, otras fuentes de presión estática que afectan a los ventiladores de succión son las siguientes:

- 1) Aire que ingresa a través de aberturas en el techo o en las paredes laterales [8].
- 2) Los efectos del viento son una fuente de presión oculta y pueden ser muy graves. Para un ventilador “desprotegido”, el viento puede hacer que un ventilador permita que el aire fluya en la dirección opuesta [8].
- 3) Las persianas colocadas en la entrada del ventilador crean una caída de presión estática. Es necesario mantener las persianas limpias y moviéndose libremente, ya que las persianas sucias restringen el área de apertura del aire [8].

La curva característica de un ventilador es la representación gráfica de todos los estados caudal-presión de los que es capaz un ventilador [24]. Dependiendo del tipo de ventilador, cada curva adopta una u otra forma. Por ejemplo, un ventilador axial opera con bajas presiones pero altos caudales, lo contrario sucede con un ventilador centrífugo que opera a altas presiones pero otorga bajos caudales, mientras que el ventilador helicocentrífugo trabaja con ambas posibilidades de caudal y presión, aunque no a la misma magnitud que los dos ventiladores anteriores [24]. Estas curvas son entregadas por el fabricante. También es importante señalar que hay que tomar en cuenta todas las pérdidas de carga a los cuales está sometido el ventilador, provocando que disminuya el caudal del mismo. Cuando un ventilador opera como succionador, su curva característica es diferente.

2.5 Sistemas tipo túnel y ventilación natural

El sistema de ventilación dominante en las instalaciones avícolas es la ventilación forzada, principalmente a través de sistemas de presión negativa [8]. Generalmente se colocan

ventiladores al final de la instalación con el fin de que succionen el aire en el interior para que aire fresco ingrese a la nave. Además, cuando el aire es succionado hacia afuera, la presión adentro es un poco menor que la exterior (o la atmosférica), por lo que el nuevo aire que ingresa trata de equilibrar esa diferencia de presión [8]. Entre más alta sea esa diferencia de presiones, más rápido el aire intenta ingresar a la instalación [17].

Los sistemas de ventilación tipo túnel utilizan la presión negativa y se han vuelto populares en las regiones donde el clima es caliente porque emplean la convección para aumentar la remoción de calor de los animales [25]. Este tipo de sistema proporciona enfriamiento por viento, movilizandoo el aire como si se tratara de un túnel de viento a lo largo de toda la instalación [7]. Una ilustración de la ventilación tipo túnel se observa en la figura 3:

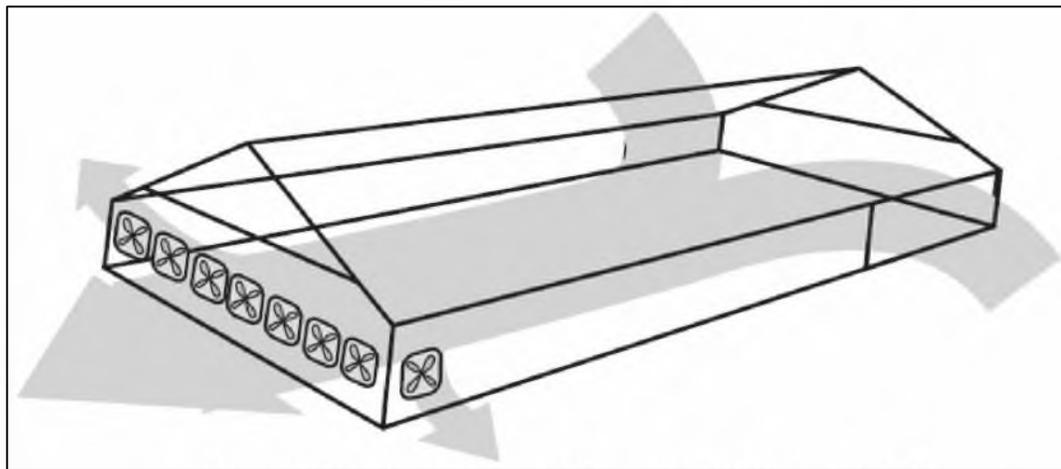


Figura 3. Funcionamiento de la ventilación tipo túnel [7]

Como se puede apreciar en la figura 3, el aire ingresa a la nave por las entradas (puede ser a través de los paneles de enfriamiento evaporativo) y empieza a ser succionado por los ventiladores que se encuentran al final de la instalación. Por lo tanto, no solo se está

introduciendo nuevo aire al ambiente interno, sino que también las aves sienten una corriente de aire fresca que les ayuda a combatir las altas temperaturas (en inglés a este efecto se le llama “*wind chill*”). La ventilación tipo túnel crea el enfriamiento por viento más efectivo [7]. Por ejemplo, si el aire adentro de la nave con humedad promedio está a 32,2 °C (90 °F) pero el aire es movilizado a 2,54 m/s (500 pies/min), las aves sentirán este aire a 26,7 °C (80°F) [7]. Aumentar la cantidad de movimiento de aire sobre un ave es uno de los métodos más efectivos que los productores pueden usar para aumentar la eliminación de calor de las aves. Las principales razones para realizar lo anterior son las siguientes [17]:

- Aumenta la pérdida de calor por convección de las aves en la nave, reduciendo así la temperatura efectiva del aire [17].
- Ayuda a eliminar el calor atrapado entre las aves y las jaulas [17].
- Disminuye los efectos adversos de ambientes con alta humedad [17].

La ventilación natural no utiliza equipos de ventilación ni de enfriamiento y solamente se suben las cortinas ubicadas en ambos lados de la nave para permitir el paso del viento exterior. Al abrir las cortinas se permite que ingrese a la nave un gran volumen de aire del exterior, igualando así las condiciones internas con las externas [7]. Incluso en climas moderados, las fluctuaciones normales en la temperatura del aire y los vientos durante el día o la noche pueden exigir que se requieran ajustes frecuentes en las cortinas, por lo que la ventilación natural o con cortinas requiere de un manejo constante [7]. La ventilación natural se basa en dos diferentes fuerzas naturales para mover aire:

- 1) El aire entra a través de las aberturas en la pared en el lado donde sopla el viento y el aire es extraído hacia las aberturas del techo [8].
- 2) El aire caliente es menos denso que el aire frío y naturalmente se eleva y fluye hacia arriba. Las diferencias de temperatura entre el aire interior caliente y el aire exterior frío hacen que el aire adentro de la instalación se eleve y salga al techo a través de chimeneas o aberturas. Este efecto se llama “flotabilidad térmica” (“*thermal buoyancy*” en inglés) [8].

Como sistema, la ventilación natural no logra tener mucho control sobre las condiciones internas de la nave [7]. Por lo tanto, si las condiciones externas e internas son similares, el efecto de la “flotabilidad térmica” será muy bajo. Así como sucede para sistemas tipo túnel, se requiere de un buen intercambio de aire para impedir que se acumule mucho aire caliente adentro de la instalación.

2.6 Otros factores que intervienen en las condiciones internas

Un factor a tomar en cuenta es la separación que existe entre la nave avícola y las obstrucciones existentes alrededor de ella. Si existen obstáculos cerca, la velocidad del viento que entra a la instalación disminuirá. Si bien es cierto que existen muchos elementos que determinan el espaciamiento óptimo entre naves (dirección del viento, velocidad del viento, topografía, etc.), existe una ecuación que permite calcular el espaciamiento mínimo recomendado entre la instalación y los obstáculos alrededor [26] [citado en (22)]:

$$D = 0,4 * H * L^{0,5} \quad (1)$$

Donde D es la distancia mínima recomendada de separación en metros, H es la altura del obstáculo en metros y L es la longitud del obstáculo en metros.

El aislamiento dentro de la instalación es otro factor a tomar en cuenta. El aislamiento de un material está diseñado para restringir el flujo de calor a través de un medio como una pared o un techo [8]. Las unidades para medir la resistencia (R) al calor en el Sistema Internacional es $K \cdot m^2/W$, donde K es grados Kelvin, m^2 es área en metros cuadrados y W es Watts. Mayores valores de R indican una mayor resistencia al paso del calor. La mayoría de los techos de las instalaciones avícolas están compuestos por láminas de hierro galvanizadas, que comúnmente suelen alcanzar entre los 50-70 °C en un día soleado [17]. El techo caliente no solo aumenta la temperatura del aire de la nave, sino que también puede aumentar drásticamente la cantidad de radiación térmica a la que están expuestas las aves [17].

Finalmente, la luz es otra variable ambiental importante a tomar en cuenta. Este parámetro es importante para la regulación hormonal y el control del comportamiento de las aves [27]. Algunas fuentes de luz también agregan calor al ambiente e indirectamente afectan el intercambio de calor entre los animales y el medio ambiente. Fuentes de luz, distribución y color, así como la duración del período de iluminación puede afectar a las gallinas su rendimiento, comportamiento y bienestar [27] [citado en (28)]. El nivel de iluminación (o iluminancia) de la luz por debajo de 5 lux es demasiado oscuro para estimular el crecimiento y la producción adecuada, mientras que un nivel de iluminación más alto (más de 50 lux) puede causar nerviosismo y un comportamiento extraño [29].

3. METODOLOGÍA

3.1 Ubicación geográfica y descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el distrito de Las Vueltas, en el cantón de La Guácima perteneciente a la provincia de Alajuela, específicamente en la coordenadas 1098023,74 Norte y 465975,94 Oeste (CRTM05) y con una elevación de 573 metros sobre el nivel del mar. Se trata de una nave avícola que le pertenece a una empresa avícola productora de huevos de mesa. En la figura 4 se puede ver una toma aérea de la nave.



Figura 4. Vista aérea de la nave avícola en estudio

La nave avícola es tipo “túnel”, tiene unas dimensiones de aproximadamente 110,27 m de largo por 12 m de ancho, cuenta con 3 baterías de jaulas de 6 niveles cada una (cada jaula tiene una altura aproximada de 0,55 m) y las jaulas tienen un área superficial de aproximadamente 0,35 m². Además cuenta con 4 paneles del sistema de enfriamiento evaporativo (dos en cada lado), donde cada panel mide 19 m de largo por 1,37 m de ancho y en la pared del fondo cuenta con 10 ventiladores de 1,27 m de diámetro cada uno. Lo anterior se puede apreciar en las figuras 5, 6 y 7:



Figura 5. Vista interna de la instalación



Figura 6. Paneles del sistema de enfriamiento evaporativo



Figura 7. Ventiladores colocados en el fondo de la nave

En la instalación se alojan alrededor de 50.000 gallinas ponedoras de huevo de 55 semanas de edad al inicio del estudio, donde la raza utilizada es Isa Brown. Los materiales de construcción en la nave son: block de concreto repellado, armadura metálica de perling, planché de concreto, lámina de zinc con aislante, malla pajera y cortina.

Modo de operación actual: La instalación cuenta con 3 sensores de humedad relativa y 4 sensores de temperatura distribuidos en el interior de la misma y sintonizados con un panel de control. Cuando la temperatura de los sensores indican 26 °C o menos, no hay ventiladores trabajando, si indican 27 °C trabajan 6 ventiladores, si indican 28 °C trabajan 8 ventiladores y si miden 29 °C o más, se utilizan los 10 ventiladores y se enciende el sistema de enfriamiento. El panel de control está en funcionamiento durante el día y por las noches los empleados apagan todos los sistemas y levantan las cortinas para permitir el paso del viento. Es decir, de día (de 6 a.m. a 5 p.m.) se trabaja con ventilación forzada con enfriamiento evaporativo y en las noches (de 5 p.m. a 6 a.m.) se trabaja con ventilación natural.

Como se mencionó al inicio, actualmente el país cuenta con poca información disponible relacionada con el tema. Se procedió a investigar trabajos relacionados a nivel internacional, con el fin de obtener una metodología para medir las variables antes descritas. Una vez teniendo una metodología inicial se le consultó al PhD Hongwei Xin de la Universidad de Iowa State, quien es uno de los investigadores más reconocidos a nivel mundial en estos temas, para efectos de mejorar la propuesta metodológica.

3.2 Medición de la temperatura y humedad relativa

La temperatura de bulbo seco y humedad relativa se midieron durante intervalos de 6 minutos a través de todo el día. Las mediciones se realizaron en las siguientes posiciones adentro de las jaulas:

- 1) A nivel del ave, en el tercer nivel de cada una de las baterías de jaulas, en las siguientes localizaciones:
 - En las dos baterías más cercanas a las paredes laterales, se colocaron sensores cada 34 jaulas, es decir, 20 metros aproximadamente (4 sensores por batería, 8 sensores en total)
 - En la batería del centro, se colocaron sensores cada 28 jaulas, es decir, 17 m aproximadamente (5 sensores)

Los sensores utilizados para medir las dos variables anteriores fueron marca Madgetech, modelo TransiTempII-RH con una precisión de $\pm 0,5$ °C y $\pm 3,5$ % y se colocaron en el interior de las jaulas.

3.3 Medición de la velocidad del aire

Se midió la velocidad del aire en las mismas localizaciones en el interior de la nave que la temperatura y humedad relativa. Se realizaron 5 mediciones de forma puntual y se tomó el promedio para cada localización. Estas mediciones se realizaron para 10, 8 y 6 abanicos en funcionamiento. No fue necesario hacer más mediciones con menor cantidad de abanicos

ya que según los encargados, la nave nunca opera con menos de 6 abanicos. El equipo utilizado fue un anemómetro marca Testo, modelo 405, con una precisión de $\pm 0,1$ m/s + 5%.

3.4 Medición de la concentración de dióxido de carbono (CO₂)

La concentración de CO₂ se midió de la misma forma que la temperatura y humedad relativa (de forma continua). Los sensores de concentración de CO₂ fueron colocados en la batería central de jaulas (en el interior de las mismas), a aproximadamente 50 m y 70 m del inicio de la batería (2 sensores). Ésta variable se midió cada 9 minutos a través de todo el día.

Los dos sensores que registraron esta variable se colocaron en esas posiciones ya que son localizaciones que se encuentran alejadas tanto del sistema de enfriamiento como de los ventiladores, esto con el fin de registrar datos “críticos” (niveles más altos o más bajos que podrían registrar y que pueden afectar a las aves). Los sensores de concentración de CO₂ también tenían la capacidad de medir temperatura y humedad relativa. El sensor utilizado fue marca Madgtech, modelo RFCO₂RHTEMP2000A, con una precisión de ± 1 °C, ± 3 % y ± 70 ppm.

3.5 Medición del nivel de iluminación o iluminancia

Esta variable fue medida en las mismas posiciones y de la misma forma que la velocidad (5 repeticiones y se tomó el promedio para cada localización). El equipo utilizado fue un luxímetro marca Sper Scientific, modelo Mini Environmental Meter 850070 con una precisión de $\pm 5 \% + 4d$.

Una visualización gráfica de los puntos de medición de las variables anteriores se puede observar en la figura 8:

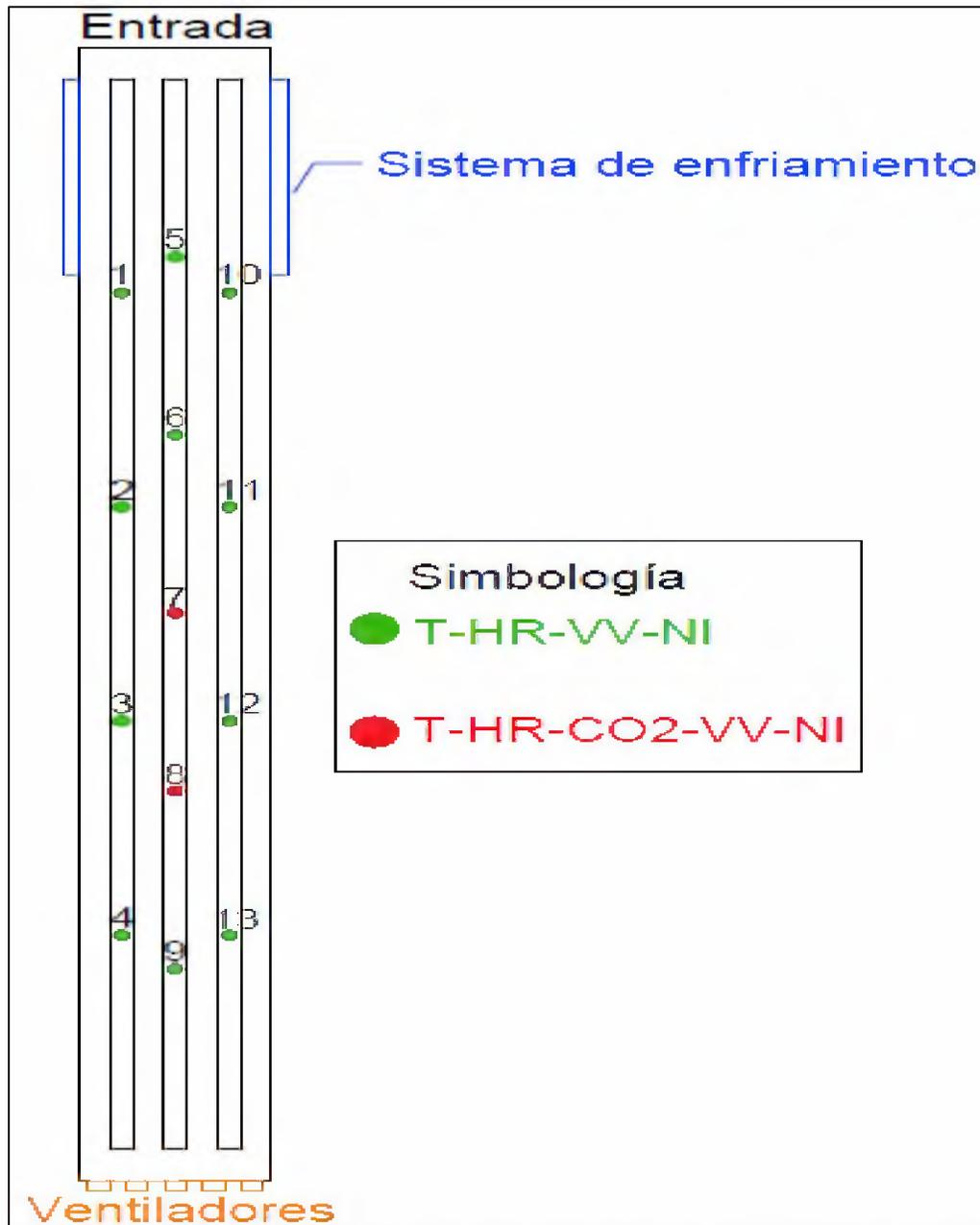


Figura 8. Posiciones de medición para todas las variables¹

Fuente: Elaboración propia

¹ Donde T es temperatura, HR es humedad relativa, CO₂ es concentración de dióxido de carbono, VV es velocidad del viento y NI es nivel de iluminación

El tiempo de medición de éstas variables fue de dos meses, del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017 (a excepción de la velocidad del viento y del nivel de iluminación, las cuales fueron medidas de forma puntual dentro de estos dos meses).

3.6 Medición de la velocidad promedio de los ventiladores

Para obtener la velocidad promedio de los ventiladores, se midió la velocidad en doce diferentes localizaciones del ventilador en su lado de descarga². Estas mediciones se realizaron el 16 de febrero del 2018. El equipo utilizado fue un anemómetro marca Prova Instruments, modelo AVM-03, con una precisión de $\pm 0,1 \text{ m/s} + 3\%$. Una visualización de los puntos de medición se muestra en la figura 9.

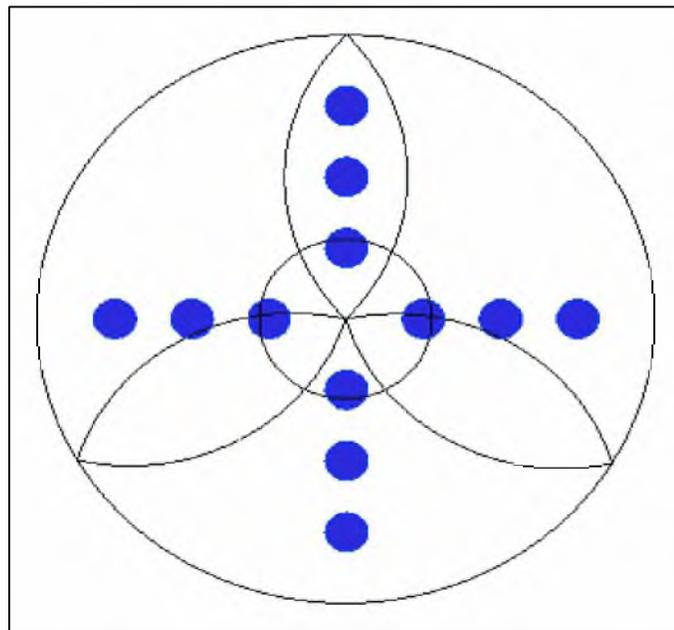


Figura 9. Localización de los puntos de medición de velocidad en el ventilador

Fuente: Elaboración propia

² Si bien es calculable el caudal y diferencia de presión según la velocidad de rotación y el contorno, es un cálculo complejo fuera de los alcances y objetivos del trabajo.

Esta metodología de velocidad es una técnica muy práctica de obtener la velocidad promedio de un ventilador, aunque entre más mediciones realizadas, más exacto es el resultado; éste método también ha sido utilizado por otros autores [22]. Los ventiladores y a sus motores que se encuentran en la nave poseen las siguientes características:

Motor:

- Marca: Bam
- Potencia: 1,5 hp
- Revoluciones por minuto: 1760 rpm
- Voltaje: 120-240 V

Ventiladores:

- Marca: Sin marca, son de fabricación local
- Tipo: Axial
- Diámetro barrido por las aspas: 1,27 m (50")
- Cantidad de aspas: 3
- Transmisión del movimiento: Por fajas o correas
- Revoluciones por minuto: 515 rpm (obtenido de la relación de diámetros entre la polea del motor y la polea del ventilador)
- Otros accesorios: Persianas (internas), protectores y conos de descarga

Una visualización de los ventiladores junto con su debida numeración para la medición de las velocidades se muestra en la figura 10:



Figura 10. Visualización de los ventiladores y sus debidas posiciones

Al multiplicar el área barrida por las aspas ($A = \pi \frac{D^2}{4}$) por la velocidad promedio se obtiene el caudal del ventilador. Es importante destacar que los motores de los ventiladores no obstruyen el paso del viento en la descarga de los abanicos.

3.6.1 Interpretación de los resultados de ventilación

Se pueden utilizar diversos métodos para poder analizar los resultados obtenidos de los caudales de los ventiladores. La primera forma de analizar estos resultados es mediante la siguiente ecuación de la capacidad de ventilación de túnel para una instalación avícola con ventilación forzada [17]:

$$CVT = \textit{Velocidad Deseada} * \textit{Área Sección Transversal} \quad (2)$$

Donde CVT es capacidad de ventilación del túnel en m³/s, velocidad deseada en m/s y el área de sección transversal en m².

Además de la tasa de intercambio de aire, es importante conocer cuánto volumen de aire se está desplazando hacia el exterior por unidad de tiempo. Utilizando la siguiente ecuación se pueden determinar los cambios de aire obtenidos en el interior de la nave:

$$\textit{Cambios de aire} = \frac{\textit{Descarga total de los ventiladores}}{\textit{Volumen del recinto}} \quad (3)$$

Otra forma de analizar los resultados es utilizando la ecuación de la tasa de ventilación adecuada para cada ave y se define mediante la ecuación (4).

$$\textit{Tasa de Ventilación} = \frac{\textit{Descarga total de los ventiladores}}{\textit{Cantidad de aves}} \quad (4)$$

Es importante destacar que la tasa de ventilación recomendada para gallinas ponedoras en climas calientes es de 0,0028 m³/s por cada ave (6 CFM por ave) [8].

3.6.2 Estimación de la presión estática de los ventiladores

Un aspecto importante es comparar los caudales de los ventiladores con la curva característica del ventilador dado por el fabricante, sin embargo, al no tener marca no fue posible realizarlo. Por lo tanto, se pueden tomar estos datos para ventiladores de un diámetro similar, compararlos con la curva característica de otro fabricante y así poder

aproximar la presión estática a la cual están trabajando. Se consultó a la página del laboratorio BESS (“*Bioenvironmental and Structural System Laboratory*” en inglés), quien es la institución encargada de realizar pruebas a los ventiladores para medir su rendimiento, con el fin de encontrar ventiladores que fueran parecidos a los ventiladores de la nave en estudio. Los ventiladores que se encontraron y que son similares a los de la nave en estudio son los siguientes:

- A) Marca: Multifan. Modelo: MF50P-C-M. Diámetro: 1,27 m (50”). Transmisión del movimiento: Por fajas. Accesorios: persianas, cono de descarga y protector.

- B) Marca: Big Dutchman. Modelo: 60-50-5200. Diámetro: 1,27 m (50”). Transmisión del movimiento: Por fajas. Accesorios: persianas, cono de descarga y protector.

3.7 Evaluación del sistema de enfriamiento evaporativo

Se utilizaron un total de 20 sensores de temperatura y humedad relativa, de los cuales 4 fueron colocados en el exterior de la nave con el fin de medir las condiciones del aire que ingresaba al sistema. Los demás sensores fueron colocados en el interior de la nave, distribuidos a lo largo de cada panel de enfriamiento (4 sensores en cada panel). En la figura 11 se muestran las posiciones de los sensores en cada panel.

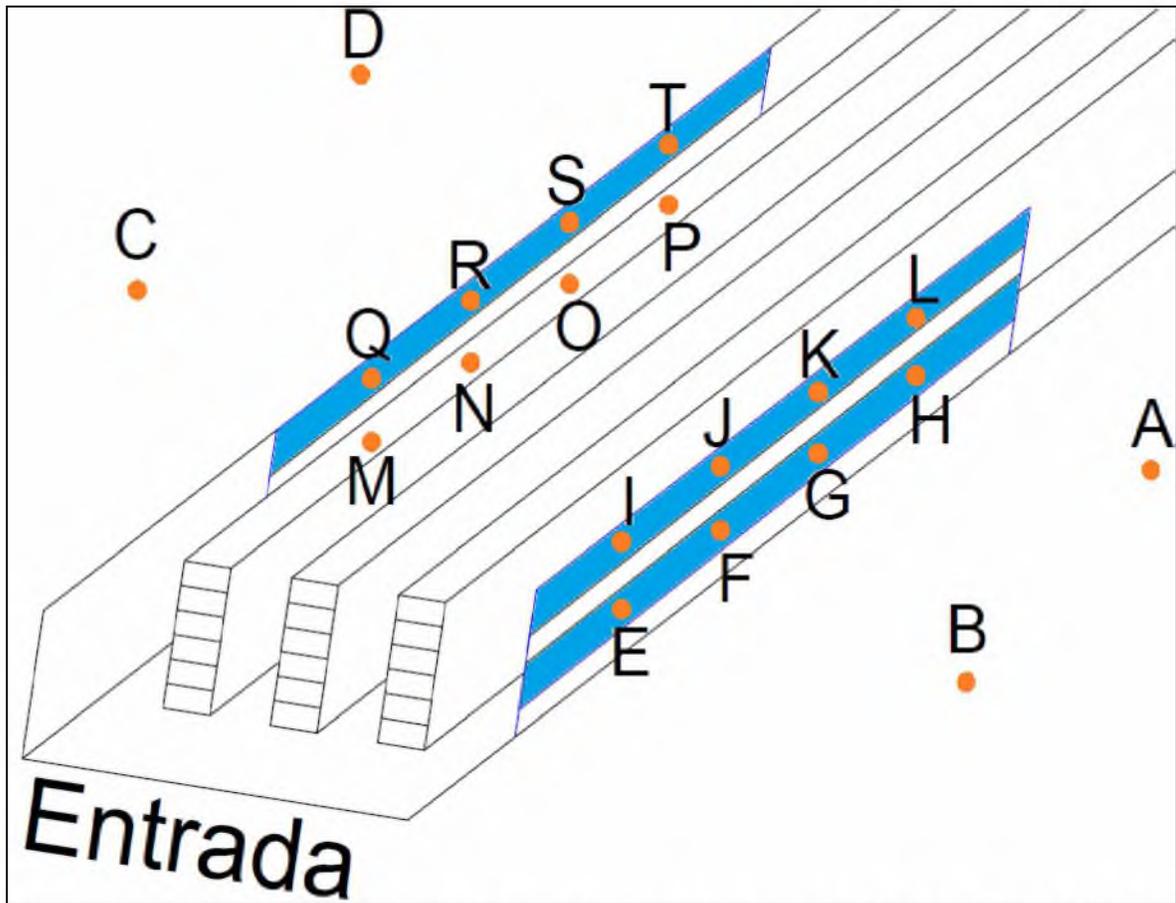


Figura 11. Posiciones de los sensores de temperatura y humedad relativa en los paneles del sistema de enfriamiento

Fuente: Elaboración propia

Estas mediciones se realizaron durante 3 semanas, del 28 de marzo al 20 de abril del 2018. Si bien es cierto que estas mediciones se realizaron en diferentes momentos que las demás variables analizadas anteriormente, esto no afectó los resultados ya que el objetivo fue solamente medir el cambio de las condiciones que existen adentro y afuera de la instalación.

La ecuación para determinar la eficiencia de cada panel es la siguiente [30]:

$$\eta = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{wb}} * 100 \quad (5)$$

Donde:

η = Eficiencia del sistema de enfriamiento evaporativo (%)

T_i = Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada del sistema (°C)

T_o = Temperatura de bulbo seco del aire a la salida del sistema (°C)

T_{wb} = Temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada del sistema (°C)

Tanto T_i como T_o son datos registrados por los sensores colocados en el exterior de la nave y cerca de cada panel de enfriamiento, respectivamente. T_{wb} se obtuvo de la carta psicrométrica y será explicado más adelante.

3.8 Medición de las temperaturas instantáneas en el interior de las jaulas

Se utilizó una cámara termográfica marca Fluke, modelo TI27 con una precisión de temperaturas de ± 2 °C o 2 %, con el fin de medir las temperaturas instantáneas de algunas de las jaulas con aves. Estas fotografías fueron tomadas el 29 de septiembre del 2017.

3.9 Tratamiento estadístico

Primeramente, se midió el grado de confiabilidad de los datos medidos con los equipos utilizados. La confiabilidad de un instrumento de medición se refiere al grado en que su aplicación repetida al mismo individuo u objeto produce resultados iguales [31]. Existen

varios métodos para poder determinar la confiabilidad en los instrumentos de medición, uno de ellos es mediante los intervalos de confianza y el coeficiente de variación (CV).

El coeficiente de variación (también conocido como coeficiente de variación de Pearson) expresa el grado de dispersión como proporción de la media aritmética y puede utilizarse siempre y cuando la media no sea cero [32]. Esto se debe a que este coeficiente divide la desviación estándar entre el promedio. Un intervalo de confianza es un rango de valores cuyos límites garantiza con cierto grado de confianza que el verdadero valor del parámetro va a estar dentro de este intervalo. Con los datos obtenidos de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, se procedió a normalizar los datos para que siguieran una distribución normal y para los intervalos de confianza se estableció un nivel de confianza de 95%. Además, se calculó el coeficiente de variación. No se realizó este procedimiento para la velocidad del viento y para el nivel de iluminación debido a que no fueron medidos de manera continua, por lo que no se cuenta con la suficiente cantidad de datos.

Seguidamente, se le dio validez a los datos obtenidos. El concepto de validez puede aplicarse en tres diferentes significados: validez de contenido, validez de criterio y validez de constructo [33]. Para este estudio, el concepto de validez que más aplica es el de validez de criterio. La validez de criterio de un instrumento de medición se establece al comparar sus resultados con los de algún criterio externo [33]. Es decir, este criterio compara los resultados obtenidos con algún parámetro conocido. Por lo tanto, la idea es comparar los datos obtenidos de las variables analizadas con los estándares establecidos para las aves. Como se mencionó anteriormente, la raza existente en la nave avícola es Isa Brown. Según

algunas fuentes, incluyendo el manual de producción de Isa, estos son los rangos recomendados cuando las aves ya están en etapa de producción:

Cuadro 1. Estándares establecidos para la raza Isa Brown

Parámetro	Valor
Temperatura	18-24 °C [34]
Humedad Relativa	60-70% [7]
Concentración CO ₂	3500 ppm máx. [9]
Ventilación Mínima	2,5 m/s mín. [7]
Nivel de Iluminación	5-10 lux [35]
Densidad	9 aves/m ² [34]

Finalmente, se realizó un análisis de clusters con los datos obtenidos. El análisis de clusters o conglomerados es una técnica multivariada cuyo principal propósito es agrupar objetos basándose en las características que poseen [36]. Este análisis clasifica objetos de tal forma que cada objeto es muy parecido a los que hay en el conglomerado con respecto a algún criterio de selección predeterminado, buscando la mayor homogeneidad en cada conglomerado y la mayor diferencia entre conglomerados [36]. El resultado de este análisis es un dendograma, en el cual se puede apreciar cuales variables forman cada conglomerado y cuales variables no tienen similitud entre sí. Para este estudio, el análisis de conglomerados ayuda a poder observar cuál es la relación que existe entre las posiciones para todas las variables analizadas. Este análisis de conglomerados se realizó mediante el programa PAST, se aplicó la distancia euclideana y se utilizaron los promedios de las variables.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Variables ambientales

Los cuadros del 2 al 8 muestran los resultados obtenidos para las mediciones de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, velocidad del viento y nivel de iluminación, obtenidos para cada posición. Los datos de la posición 9 no aparecen debido a que se tuvo problemas con el sensor en esa localización (registraba temperatura y humedad relativa). Además, la humedad relativa en la posición 10 se omitió debido a que presentaba datos muy inconsistentes.

Cuadro 2. Mediciones de temperatura para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (°C)	Mediana (°C)	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Desviación Estándar (σ)
1	14641	27,20	27,10	21,20	33,30	1,83
2	14641	28,12	28,40	21,10	32,30	1,89
3	14641	27,63	27,90	20,10	33,80	2,62
4	14641	27,03	26,70	19,70	33,60	3,06
5	14641	29,88	30,00	25,30	32,80	1,08
6	14641	28,36	28,50	23,70	31,90	1,26
7	9761	29,11	29,20	23,84	32,24	1,31
8	9761	28,63	28,72	23,68	32,24	1,40
9	-	-	-	-	-	-
10	14641	27,5	27,70	21,70	32,70	2,25
11	14641	27,97	28,10	21,90	31,90	1,39
12	14641	27,98	28,10	21,80	32,10	1,62
13	14641	27,84	27,90	21,10	32,40	1,90

Cuadro 3. Mediciones de humedad relativa para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (%)	Mediana (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Desviación Estándar (σ)
1	14641	81,97	81,90	58,10	96,30	5,55
2	14641	77,19	76,80	61,60	96,20	4,28
3	14641	79,53	78,90	56,30	99,80	5,92
4	14641	79,94	80,00	59,50	97,40	6,99
5	14641	72,47	72,30	62,60	88,90	2,78
6	14641	74,10	74,30	62,30	82,10	2,42
7	9761	73,29	73,20	62,72	82,24	3,13
8	9761	74,06	74,32	61,20	93,76	2,80
9	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-
11	14641	77,25	77,10	63,60	97,80	3,29
12	14641	77,34	77,20	63,20	97,00	3,12
13	14641	77,65	77,50	63,20	94,10	3,50

Cuadro 4. Mediciones de concentración de CO₂ para cada posición tomados del 26 de agosto al 26 de octubre del 2017

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (ppm)	Mediana (ppm)	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Desviación Estándar (σ)
7	9761	3800,75	3800,00	2220,00	7990,00	622,73
8	9761	5122,18	5180,00	3340,00	7810,00	743,01

Donde ppm es partes por millón

Cuadro 5. Mediciones de velocidad del viento con diez ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (m/s)	Mediana (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Desviación Estándar (σ)
1	5	0,96	0,95	0,88	1,06	0,07
2	5	0,72	0,73	0,67	0,75	0,03
3	5	0,80	0,81	0,73	0,83	0,04
4	5	0,83	0,85	0,77	0,86	0,03
5	5	1,24	1,23	1,20	1,29	0,03
6	5	1,19	1,18	1,15	1,25	0,03
7	5	0,98	1,00	0,90	1,03	0,05
8	5	0,81	0,81	0,78	0,84	0,02
9	5	0,89	0,89	0,86	0,91	0,02
10	5	0,86	0,88	0,77	0,92	0,05
11	5	0,97	0,97	0,92	1,02	0,03
12	5	0,65	0,64	0,57	0,74	0,06
13	5	0,91	0,90	0,89	0,93	0,02

Cuadro 6. Mediciones de velocidad del viento con ocho ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (m/s)	Mediana (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Desviación Estándar (σ)
1	5	0,81	0,83	0,70	0,85	0,05
2	5	0,80	0,81	0,76	0,84	0,03
3	5	0,64	0,65	0,59	0,69	0,03
4	5	0,72	0,70	0,68	0,76	0,03
5	5	1,12	1,12	1,07	1,16	0,03
6	5	1,04	1,05	0,97	1,08	0,04
7	5	0,71	0,73	0,66	0,76	0,04
8	5	0,69	0,69	0,68	0,71	0,01
9	5	0,77	0,75	0,74	0,82	0,03
10	5	1,05	1,05	1,01	1,11	0,03
11	5	0,92	0,90	0,89	0,97	0,03
12	5	0,76	0,76	0,72	0,82	0,03
13	5	0,87	0,87	0,83	0,90	0,03

Cuadro 7. Mediciones de velocidad del viento con seis ventiladores en funcionamiento medidos de forma puntual

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (m/s)	Mediana (m/s)	Mínimo (m/s)	Máximo (m/s)	Desviación Estándar (σ)
1	5	0,86	0,86	0,79	0,93	0,05
2	5	0,79	0,76	0,69	0,92	0,09
3	5	0,49	0,46	0,42	0,63	0,07
4	5	0,65	0,65	0,59	0,71	0,04
5	5	0,85	0,85	0,80	0,89	0,03
6	5	0,64	0,63	0,60	0,67	0,03
7	5	0,59	0,58	0,52	0,68	0,05
8	5	0,58	0,57	0,50	0,68	0,06
9	5	0,71	0,71	0,67	0,75	0,03
10	5	0,88	0,88	0,83	0,93	0,03
11	5	0,75	0,76	0,70	0,78	0,03
12	5	0,44	0,45	0,40	0,49	0,03
13	5	0,70	0,69	0,63	0,75	0,04

Cuadro 8. Mediciones de iluminancia medidos de forma puntual

Posición	Cantidad de Datos	Promedio (lux)	Mediana (lux)	Mínimo (lux)	Máximo (lux)	Desviación Estándar (σ)
1	5	165,00	165,00	163,00	166,00	1,10
2	5	79,40	79,00	79,00	80,00	0,49
3	5	171,60	172,00	170,00	173,00	1,02
4	5	140,40	140,00	140,00	141,00	0,49
5	5	13,00	13,00	13,00	13,00	0,00
6	5	23,00	23,00	23,00	23,00	0,00
7	5	52,40	53,00	51,00	53,00	0,80
8	5	30,40	30,00	30,00	31,00	0,49
9	5	42,00	42,00	41,00	43,00	0,63
10	5	192,20	192,00	190,00	194,00	1,33
11	5	402,80	403,00	402,00	404,00	0,75
12	5	205,60	206,00	204,00	207,00	1,02
13	5	159,20	159,00	158,00	160,00	0,75

Para el caso de la temperatura, la humedad relativa y la concentración de dióxido de carbono, los cuadros anteriores contemplan el registro de 24 horas durante los 2 meses de período de toma de datos. Prácticamente en todas las posiciones de todas las variables, la mediana es igual o muy similar a la media, por lo que las distribuciones son muy simétricas. Para las variables de temperatura y humedad relativa, se pueden observar que en promedio, las posiciones de la batería central (posiciones 5, 6, 7 y 8) obtuvieron temperaturas más elevadas y humedades relativas más bajas con respecto a las posiciones de las baterías laterales. La concentración de CO₂ en promedio sobrepasó los 3500 ppm para ambas posiciones analizadas que corresponden a posiciones de la batería central. Con lo que respecta a la velocidad del viento, solo en dos posiciones se superaron en promedio 1 m/s tanto para 10 como para 8 ventiladores en funcionamiento; esto no sucedió en ninguna posición para 6 ventiladores en funcionamiento. La iluminancia en promedio fue más elevada en las posiciones de las baterías laterales que las centrales, e incluso en una de las posiciones laterales se superó los 400 lux.

La desviación estándar es baja (menor a 10) en todas las posiciones para todas las variables, a excepción de la concentración de CO₂, por lo que los datos obtenidos en esa variable están muy dispersos. Lo anterior se pudo atribuir a las dos formas de operación de la nave, donde en la ventilación natural no hay tanto movimiento de aire como en ventilación forzada y esto pudo provocar que en las noches las concentraciones de CO₂ fueran mayores. Para la velocidad del viento (tanto para 6, 8 y 10 ventiladores en funcionamiento) y para el nivel de iluminación, la desviación estándar son muy bajas en todas las

posiciones. La desviación estándar alta o baja indica si los datos están muy dispersos con respecto al promedio, pero no menciona si los datos de cada variable están dispersos o no dentro de cada rango establecido; esto se discutirá más adelante.

4.2 Modelo estadístico

4.2.1 Confiabilidad de los datos

Cuadro 9. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la temperatura

Posición	Promedio (°C)	Coeficiente de Variación	Intervalo Confianza (95%)	
			Límite Inferior	Límite Superior
1	27,20	6,73	27,17	27,35
2	28,12	6,72	28,08	28,15
3	27,63	9,48	27,59	27,68
4	27,03	11,32	26,98	27,08
5	29,88	3,61	29,86	29,90
6	28,36	4,44	28,34	28,38
7	29,11	4,50	29,08	29,13
8	28,63	4,89	28,60	28,66
9	-	-	-	-
10	27,5	8,18	27,46	27,54
11	27,97	4,97	27,94	27,99
12	27,98	5,79	27,95	28,01
13	27,84	6,82	27,81	27,87

Cuadro 10. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la humedad relativa

Posición	Promedio (%)	Coeficiente de Variación	Intervalo Confianza (95%)	
			Límite Inferior	Límite Superior
1	81,97	6,77	81,88	82,06
2	77,19	5,54	77,13	77,27
3	79,53	7,44	79,43	79,63
4	79,94	8,74	79,83	80,05
5	72,47	3,84	72,42	72,51
6	74,10	3,27	74,06	74,14
7	73,29	4,27	73,23	73,36
8	74,06	3,78	74,04	74,12
9	-	-	-	-
10	-	-	-	-
11	77,25	4,26	77,20	77,30
12	77,34	4,03	77,29	77,39
13	77,65	4,51	77,60	77,71

Cuadro 11. Cálculo del coeficiente de variación y los límites de confianza para la concentración de CO₂

Posición	Promedio (ppm)	Coeficiente de Variación	Intervalo Confianza (95%)	
			Límite Inferior	Límite Superior
7	3800,75	16,38	3786,69	3814,16
8	5122,18	14,51	5106,37	5135,91

Como se puede apreciar en los cuadros 9, 10 y 11, los coeficientes de variación se mantuvieron menos del 10% a excepción de una posición de temperatura y dos de la concentración de CO₂. Todos los coeficientes de variación permanecieron por debajo del 20% por lo que la precisión de los datos se considera entre aceptable y buena [37].

Debido a que los valores extremos fueron eliminados, la variabilidad de los datos no es mayor de lo esperado y pueden ser comparables. Por lo tanto, el conjunto de datos son estables y muestran confiabilidad, aunque esto no significa que los datos sean exactos.

4.2.2 Validez de los datos

Cuadro 12. Porcentaje de datos adentro de las recomendaciones para cada variable durante los dos meses de estudio

Posición	Temperatura	Humedad Relativa	Concentración CO₂	Velocidad Viento (10 ventiladores)	Nivel de Iluminación
1	4,49	0,75	-	0,00	0,00
2	3,33	3,10	-	0,00	0,00
3	10,09	4,55	-	0,00	0,00
4	20,87	7,46	-	0,00	0,00
5	0,00	19,66	-	0,00	0,00
6	0,14	5,16	-	0,00	0,00
7	0,11	19,55	34,07	0,00	0,00
8	0,38	10,74	0,04	0,00	0,00
9	-	-	-	-	-
10	6,31	-	-	0,00	0,00
11	0,76	1,11	-	0,00	0,00
12	1,24	1,10	-	0,00	0,00
13	3,14	1,54	-	0,00	0,00

Como se puede apreciar en el cuadro 12 en todas las posiciones para las variables analizadas, los porcentajes de datos adentro del rango establecido son sumamente bajos. En el caso de la temperatura, el porcentaje de datos más alto se presentó en las posiciones 3 y 4, las cuales están localizadas en una de las baterías de jaulas de los extremos. Las posiciones de la batería de jaulas del centro (5, 6, 7 y 8) presentan serios problemas de

exceso de temperatura, ya que ninguna de esas posiciones, ni siquiera el 1% del tiempo la temperatura estuvo dentro del rango recomendado. En la posición 5 no se registró ni un solo dato con la temperatura debajo de 24 °C. La situación es similar en el caso de la humedad relativa, donde en ninguna posición se alcanzaron valores superiores al 20%. Para la concentración de CO₂, la posición 7 registró una mayor cantidad de datos dentro del límite permitido que en la posición 8. Aun así en la posición 7, un 34,07% implica que solo durante ese porcentaje del tiempo la concentración de CO₂ estuvo dentro del rango establecido, el cual es un dato bajo debido al problema de tener altas concentraciones de CO₂, porque pueden llegar a afectar la respiración y el metabolismo fisiológico del animal [6]. Tanto para la velocidad del viento como para el nivel de iluminación, no se reportó ningún dato que estuviera entre los intervalos recomendados. Estas dos variables fueron medidas de manera puntual, donde se tomó el promedio con pocos datos registrados. El objetivo de mostrar los datos de velocidad del viento y del nivel de iluminación se realizó con el fin de conocer los valores de estas variables en cada posición, pero no reflejan lo que percibieron las aves en términos de velocidad e iluminancia durante los 2 meses de estudio. Durante todo el período de observación, los datos no se encontraron dentro de los rangos recomendados, esto podría repercutir en la comodidad y la salud de las aves, así como la producción de huevos.

En cuanto a la recomendación de la densidad, se mencionó anteriormente que las jaulas tienen un área superficial de aproximadamente 0,35 m², donde la cantidad de aves por jaula que maneja la empresa es cambiante, en algunas jaulas tienen 7 aves, en otras 8, en otras 9

y en otras 10 (de acuerdo a las observaciones realizadas en campo). Aun así en todos los valores anteriores, no se cumple la recomendación de 9 aves por metro cuadrado (o 450 cm² por ave como mínimo), por lo que existen muchas jaulas que están sobrepobladas.

4.2.3 Análisis de conglomerados

En el análisis de conglomerados se contemplaron ocho variables: temperatura de día, temperatura de noche, humedad relativa de día, humedad relativa de noche, velocidad del viento con 6, 8 y 10 ventiladores en funcionamiento y nivel de iluminación. Los promedios de las variables de día (ventilación forzada) y de noche (ventilación natural) serán presentados más adelante, mientras que los promedios de las velocidades y los niveles de iluminación ya fueron mencionados anteriormente. A continuación se muestra el resultado de dicho análisis:

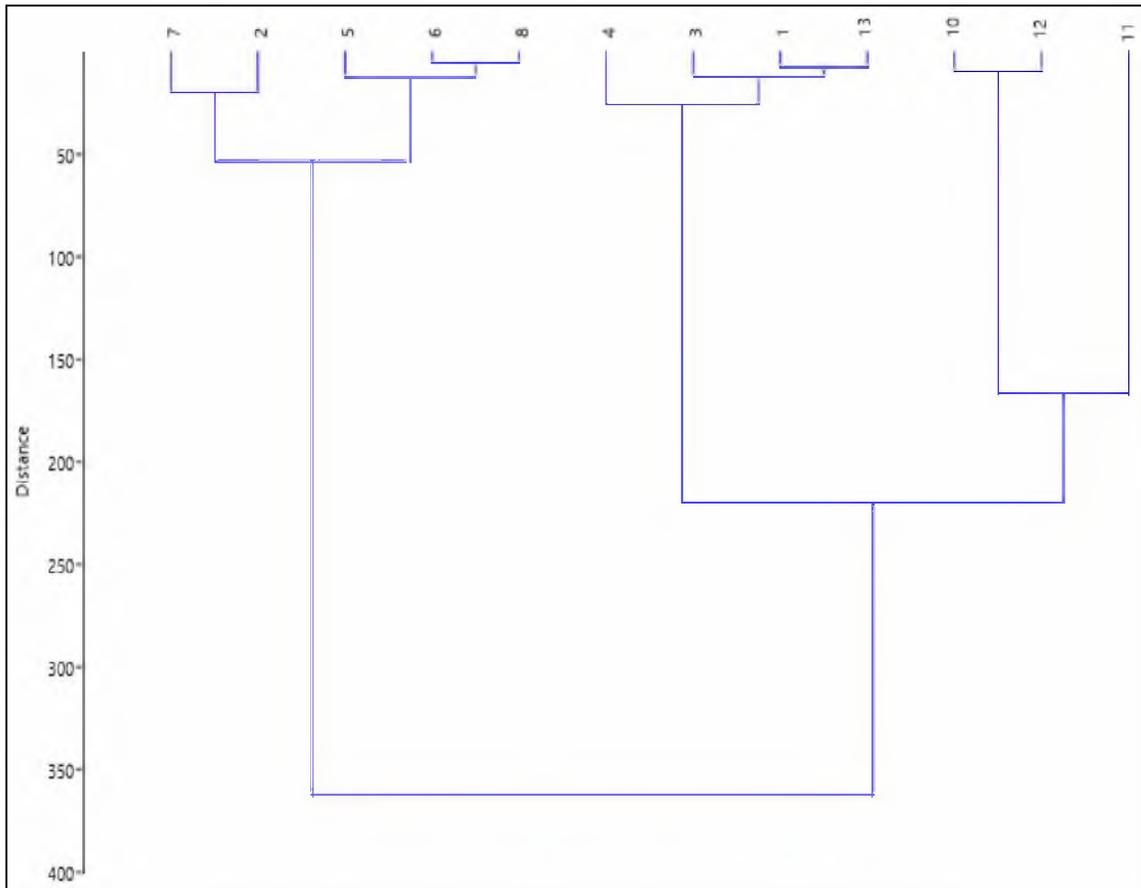


Figura 12. Análisis de conglomerados para cada posición

En la figura 12 se pueden observar dos grandes grupos y un grupo con un subgrupo. El primer grupo está conformado por las posiciones 7, 2, 5, 6 y 8 mientras que el segundo grupo está conformado por las posiciones 4, 3, 1, 13, 10, 12 y 11. La posición 9 no se tomó en cuenta debido a un problema que se tuvo con el sensor. El primer grupo tuvo en promedio una mayor temperatura de día y de noche, una menor humedad relativa de día y de noche, una mayor velocidad del viento con 10 ventiladores en funcionamiento y un menor nivel de iluminación. El resultado del análisis de clusters mostró dos grupos muy definidos de acuerdo a su posición; el primer grupo relaciona las posiciones de la batería

central de jaulas (posiciones 5, 6, 7 y 8) junto con una de las posiciones laterales (posición 2), el otro grupo lo conformaron las restantes posiciones (1, 3, 4, 9, 10, 11 y 12) que se situaron en las baterías de jaulas laterales. Es decir, hubo sectores adentro de la instalación donde las condiciones ambientales son diferentes entre sí. La zona central experimentó temperaturas más elevadas y humedades relativas más bajas a lo largo de todo el día, con respecto al otro grupo del análisis de conglomerados. Esto indica que el sistema de enfriamiento evaporativo ayudó a disminuir un poco la temperatura en las jaulas laterales pero provocó un aumento en la humedad relativa; en la parte central no se observó este efecto. En la misma zona central, se obtuvo un nivel de iluminación menor con respecto a las baterías de jaulas laterales. Lo anterior se puede explicar debido a que las paredes laterales de la nave están compuestas por una malla pajera y una cortina de color azul, permitiendo así el paso de la luz solar en esas posiciones.

4.3 Ventilación natural y ventilación forzada

Se separaron los datos de día y de noche para la temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, por lo que para el día se utilizaron datos de 6:00 a.m. a 5:00 p.m. (ventilación forzada) y para la noche de 5:00 p.m. a 6:00 a.m. (ventilación natural), esto durante los dos meses de estudio. Los promedios de día y de noche, así como la cantidad de datos de cada variable para cada posición se observan en los cuadros 13 y 14:

Cuadro 13. Promedios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ durante la ventilación forzada suministrada de 6:00 a.m. a 5:00 p.m.

Posición	Cantidad de Datos	Temperatura Día (°C)	Cantidad de Datos	H.R. Día (%)	Cantidad de Datos	CO ₂ Día (ppm)
1	6710	26,35	6710	85,23	-	-
2	6710	29,18	6710	75,73	-	-
3	6710	29,77	6710	74,82	-	-
4	6710	29,76	6710	73,76	-	-
5	6710	30,70	6710	73,64	-	-
6	6710	28,31	6710	75,15	-	-
7	4515	28,85	4515	74,73	4515	3592,68
8	4515	29,28	4515	74,02	4515	5084,92
9	-	-	-	-	-	-
10	6710	25,69	-	-	-	-
11	6710	28,30	6710	77,57	-	-
12	6710	28,87	6710	76,18	-	-
13	6710	28,98	6710	75,91	-	-

Cuadro 14. Promedios de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ durante la ventilación natural suministrada de 5:00 p.m. a 6:00 a.m.

Posición	Cantidad de Datos	Temperatura Noche (°C)	Cantidad de Datos	H.R. Noche (%)	Cantidad de Datos	CO ₂ Noche (ppm)
1	7931	27,93	7931	79,14	-	-
2	7931	27,20	7931	78,44	-	-
3	7931	25,81	7931	83,56	-	-
4	7931	24,69	7931	85,22	-	-
5	7931	30,03	7931	71,45	-	-
6	7931	28,41	7931	73,18	-	-
7	5246	29,33	5246	72,06	5246	4003,45
8	5246	28,07	5246	74,11	5246	5175,12
9	-	-	-	-	-	-
10	7931	29,06	7931	-	-	-
11	7931	27,69	7931	76,95	-	-
12	7931	27,22	7931	78,32	-	-
13	7931	26,87	7931	79,13	-	-

Como se puede apreciar en los cuadros 13 y 14, ninguno de los dos métodos de ventilación utilizados lograron que los promedios de los datos de temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂ permanecieran adentro de los rangos recomendados. El tema de ventilación será mencionado más adelante, pero un factor crucial es que el área de sección transversal adentro de la instalación es muy alta. Esto provoca que las velocidades sean bajas, por lo que no se está retirando de forma adecuada la humedad y el dióxido de carbono adentro de las jaulas.

Se realizó otra partición de los datos de acuerdo a diferentes momentos del día con el fin de observar las variaciones de estas variables a través del día para cada una de las posiciones analizadas. Los siguientes cuadros muestran lo señalado anteriormente:

Cuadro 15. Datos de temperatura bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 6-9 a.m. (°C)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 p.m. (°C)	Cantidad de Datos	Promedio 1- 5 p.m. (°C)
1	1769	25,92	2379	26,85	2379	26,16
2	1769	28,49	2379	29,94	2379	28,95
3	1769	29,09	2379	30,53	2379	29,50
4	1769	28,93	2379	30,76	2379	29,39
5	1769	29,05	2379	29,86	2379	30,03
6	1769	27,57	2379	28,61	2379	28,56
7	1159	28,24	1586	29,09	1586	29,06
8	1159	28,46	1586	29,64	1586	29,53
9	-	-	-	-	-	-
10	1769	25,29	2379	26,00	2379	25,67
11	1769	27,45	2379	28,94	2379	28,29
12	1769	27,96	2379	29,51	2379	28,91
13	1769	27,86	2379	29,80	2379	29,00

Cuadro 16. Datos de humedad relativa bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 6-9 a.m. (%)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 p.m. (%)	Cantidad de Datos	Promedio 1- 5 p.m. (%)
1	1769	82,19	2379	85,01	2379	87,73
2	1769	74,31	2379	74,84	2379	77,66
3	1769	73,85	2379	73,58	2379	76,78
4	1769	73,70	2379	71,92	2379	75,64
5	1769	71,36	2379	74,48	2379	74,51
6	1769	73,85	2379	75,43	2379	75,86
7	1159	72,18	1586	75,39	1586	76,05
8	1159	72,32	1586	74,20	1586	75,18
9	-	-	-	-	-	-
10	1769	-	2379	-	2379	-
11	1769	76,22	2379	76,91	2379	79,25
12	1769	75,38	2379	75,36	2379	77,60
13	1769	75,90	2379	74,49	2379	77,34

Cuadro 17. Datos de concentración de CO₂ bajo ventilación forzada a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 6-9 a.m. (ppm)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 p.m. (ppm)	Cantidad de Datos	Promedio 1- 5 p.m. (ppm)
7	1159	3635,09	1586	3521,13	1586	3632,74
8	1159	5162,62	1586	5004,86	1586	5106,52

Cuadro 18. Datos de temperatura bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 5-9 p.m. (°C)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 a.m. (°C)	Cantidad de Datos	Promedio 1-6 a.m. (°C)
1	2318	28,43	2379	28,24	2989	27,31
2	2318	27,99	2379	27,27	2989	26,56
3	2318	27,04	2379	25,81	2989	24,86
4	2318	25,89	2379	24,58	2989	23,86
5	2318	30,50	2379	30,19	2989	29,55
6	2318	29,10	2379	28,58	2989	27,75
7	1525	29,87	1586	29,51	1952	28,72
8	1525	29,03	1586	28,07	1952	27,28
9	-	-	-	-	-	-
10	2318	29,2	2379	29,38	2989	28,71
11	2318	28,05	2379	27,93	2989	27,24
12	2318	27,90	2379	27,39	2989	26,57
13	2318	27,75	2379	27,01	2989	26,01

Cuadro 19. Datos de humedad relativa bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 5-9 p.m. (%)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 a.m. (%)	Cantidad de Datos	Promedio 1-6 a.m. (%)
1	2318	80,63	2379	78,64	2989	78,38
2	2318	78,33	2379	78,66	2989	78,31
3	2318	81,90	2379	83,98	2989	84,50
4	2318	83,58	2379	85,95	2989	85,92
5	2318	72,88	2379	71,50	2989	70,31
6	2318	73,67	2379	73,14	2989	72,83
7	1525	73,30	1586	71,59	1952	71,43
8	1525	73,88	1586	74,28	1952	74,11
9	-	-	-	-	-	-
10	2318	-	2379	-	2989	-
11	2318	78,35	2379	76,64	2989	76,09
12	2318	78,90	2379	78,18	2989	77,94
13	2318	78,75	2379	79,15	2989	79,39

Cuadro 20. Datos de concentración de CO₂ bajo ventilación natural a diferentes horas del día

Posición	Cantidad de Datos	Promedio 5-9 p.m. (ppm)	Cantidad de Datos	Promedio 9-1 a.m. (ppm)	Cantidad de Datos	Promedio 1- 6 a.m. (ppm)
7	1525	3982,07	1586	4018,80	1952	3998,3
8	1525	5141,68	1586	5213,25	1952	5162,28

En el caso de la ventilación forzada (cuadros 15, 16 y 17), se pudo observar que en las posiciones más cercanas a los sistemas de enfriamiento (posiciones 1 y 10) se registraron las temperaturas más bajas y las humedades relativas más altas, el cual era un resultado esperable. La concentración de CO₂ resultó ser más alta en la posición más cercana a los ventiladores y esto se puede explicar porque el aire que recorre todo el largo de la instalación arrastra los gases nocivos de las jaulas por las que va pasando. Además se observó que las temperaturas más altas que se obtuvieron fueron registradas entre las 9:00 a.m. y la 1:00 p.m., por lo que ciertamente durante ese tiempo la temperatura externa fue la más elevada durante el día. Estas horas entre 9:00 a.m. y 1:00 p.m. representan las más críticas durante el día, sin embargo en las restantes horas la temperatura también fue elevada. En el caso de la humedad relativa, los datos más elevados se registraron entre la 1:00 p.m. y las 5:00 p.m. mientras que las más bajas se registraron entre las 6:00 a.m. y las 9:00 a.m. La concentración de CO₂ se mantuvo prácticamente constante durante los tres intervalos analizados.

En el caso de la ventilación natural (cuadros 18, 19 y 20), se observó cómo en las posiciones de la batería central de jaulas (posiciones 5, 6, 7 y 8) las temperaturas fueron

más elevadas debido a que en esa localización se recibió un menor flujo de aire. La temperatura entre las 5:00 p.m. y las 9:00 p.m. fue en promedio un poco más elevada con respecto a los otros dos intervalos, mientras que la humedad relativa y la concentración de CO₂ permanecieron prácticamente constantes durante las noches. Los promedios de noche para las posiciones externas a la nave fueron de 21,50 °C para el caso de la temperatura y 85,10% para el caso de la humedad relativa. A pesar de que la temperatura exterior mediante ventilación natural fue en promedio considerablemente menor que las temperaturas de los tres intervalos analizados, no fue suficiente para disminuir la temperatura en las jaulas debido al calor que producen las aves.

4.4 Imágenes de la cámara termográfica

Se utilizó una cámara termográfica con el fin de representar las temperaturas instantáneas de las aves y sus alrededores. En las figuras 13 y 14 se muestran dos fotografías tomadas con dicha cámara.

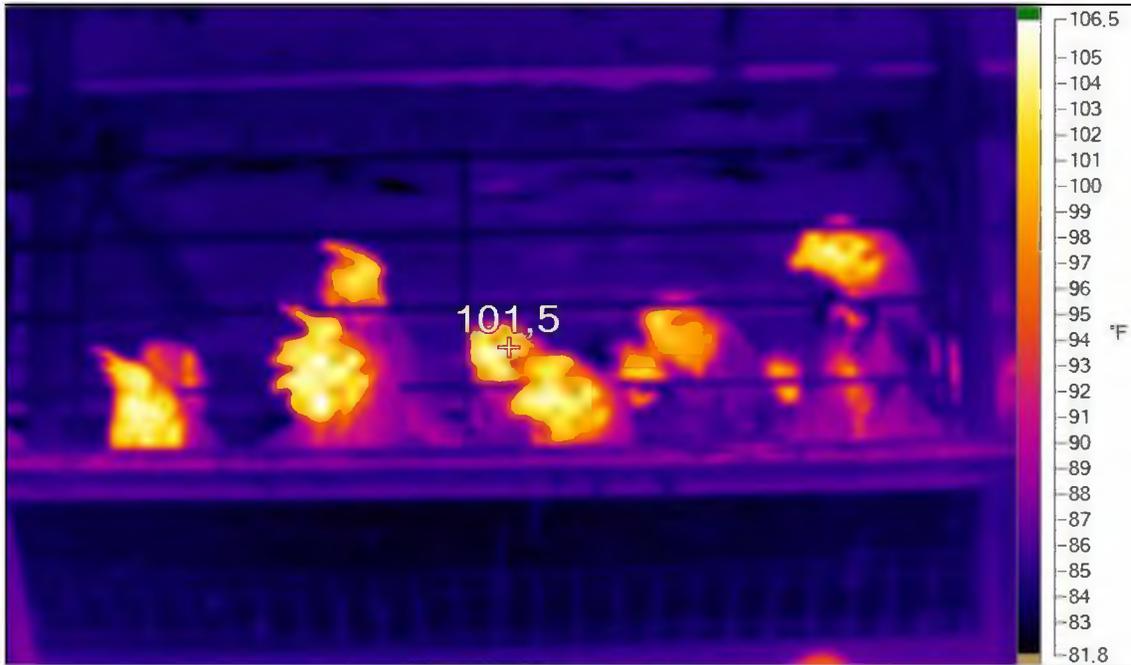


Figura 13. Imagen captada a una jaula con la cámara termográfica con unidades de temperatura en grados Farenheit

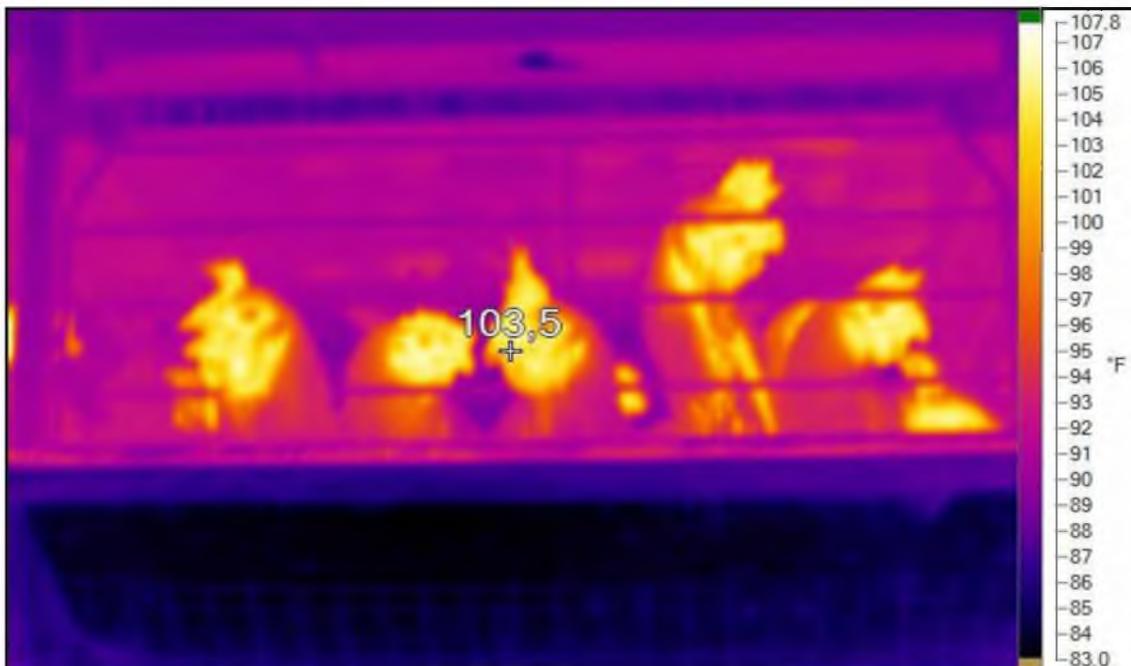


Figura 14. Fotografía de una jaula con la cámara termográfica con unidades de temperatura en grados Farenheit

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, las temperaturas superficiales de las aves rodean los valores de 100 °F, que corresponden a 37,78 °C. En la figura 13 la temperatura adentro de las jaulas fue de aproximadamente 29.44 °C (85 °F) y para la figura 14 la temperatura adentro de las jaulas fue de aproximadamente 32,78 °C (91 °F). Estos dos valores son muy altos y confirma las altas temperaturas registradas por los sensores en el interior de las jaulas. Esto también es consecuencia de la sobrepoblación de aves. Como se mencionó anteriormente, la recomendación es de alojar no más de 9 aves por metro cuadrado y durante las visitas a la nave se observaron jaulas de hasta 10 aves. Este es un aspecto importante a tomar en cuenta ya que a medida que la densidad aumenta, el movimiento de aire alrededor de cada ave disminuirá, lo que tenderá a reducir la eliminación de calor y a aumentar las temperaturas corporales [38].

4.5 Ventilación

Los resultados de las velocidades del viento promedio en cada una de las posiciones analizadas se muestran en los cuadros 4, 5 y 6 para cierto número de ventiladores en funcionamiento. Como se mencionó anteriormente, una medición de la velocidad del aire que no cambia significativamente dentro de una nave es la velocidad promedio. Si la altura del techo o el ancho de la nave no cambian y las paredes laterales están cerradas, la velocidad promedio del aire debe permanecer igual [11]. La recomendación mínima de velocidad del viento para naves tipo túnel es de 2,5 m/s y ningún dato de velocidad registrado llegó a ese valor. Esto no descarta que en ningún momento la velocidad superara los 2,5 m/s, pero los datos recolectados dan una idea de lo que está sucediendo adentro de

la instalación en términos de velocidad. Sin embargo, el problema de la nave fue que sus áreas de sección transversal son grandes debido a que la altura del techo es elevada. Esto provocó que las velocidades en el interior de la nave fueran más bajas, por lo que difícilmente las velocidades en el interior superaron la recomendación mínima. Al tener un área transversal grande ($55,4 \text{ m}^2$), provoca que la velocidad de flujo dentro del recinto se vuelva laminar, con lo que el coeficiente de pérdida se vuelve mucho mayor de lo esperado y los ventiladores no pueden descargar ni un 10% de su capacidad nominal.

Los resultados muestran que las posiciones más cercanas a la entrada (posiciones 1, 5 y 10) son las que cuentan con las velocidades más altas y se observó prácticamente en todos los casos, tanto para 6, 8 y 10 ventiladores en funcionamiento. Esto debido a que la velocidad máxima del aire no se alcanza hasta que se llegue al final de la abertura de entrada del túnel [11].

Según los encargados de la nave en estudio, la gran mayoría del tiempo la nave opera con 10 ventiladores. Bajo esta situación, en promedio, las posiciones laterales contaron con las velocidades más bajas con respecto a las posiciones centrales. Una de las posibles causas es la rugosidad de las paredes laterales y a las obstrucciones que se encuentran a los lados de la instalación. Sin embargo, los resultados obtenidos muestran que el aire no está siendo retirado de forma adecuada, ya que lo ideal es que el aire debe ser cambiado por lo menos una vez en un minuto [39].

Con respecto a los caudales de los ventiladores, estos se muestran a continuación:

- Caudal del Ventilador #1: $5,50 \text{ m}^3/\text{s} = 11.655 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #2: $6,44 \text{ m}^3/\text{s} = 13.645 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #3: $6,26 \text{ m}^3/\text{s} = 13.265 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #4: $6,37 \text{ m}^3/\text{s} = 13.500 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #5: $6,54 \text{ m}^3/\text{s} = 13.860 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #6: $5,79 \text{ m}^3/\text{s} = 12.270 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #7: $6,55 \text{ m}^3/\text{s} = 13.880 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #8: $5,65 \text{ m}^3/\text{s} = 11.970 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)
- Caudal del Ventilador #9: $6,31 \text{ m}^3/\text{s} = 13.370 \text{ ft}^3/\text{min}$ (CFM)

No fue posible medir las velocidades en el ventilador #10 debido a que en el momento de la medición, éste se encontraba desarmado. Utilizando la ecuación (2), se obtiene que la capacidad de ventilación de túnel es de: $138,5 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir, se requiere de una tasa de intercambio de aire de $138,5 \text{ m}^3/\text{s}$ adentro de la instalación en estudio. Dividiendo el valor anterior entre la cantidad de ventiladores existentes (10 ventiladores) se obtiene el caudal requerido para cada ventilador, es decir, cada ventilador debería de otorgar $13,85 \text{ m}^3/\text{s}$. Comparando este valor con los caudales calculados anteriormente, se puede observar que estos generaron menos de la mitad del caudal requerido.

Para conocer los cambios de aire adentro de la instalación se aplicó la ecuación (3). Utilizando los 9 caudales de los ventiladores obtenidos, la ecuación (3) mostró que los cambios de aire son de $32,66 \text{ h}^{-1}$. El valor anterior indica una frecuencia, es decir, ocurren

32,66 cambios de volumen de aire cada hora. Anteriormente se destacó que es recomendable cambiar el volumen de aire de una instalación avícola en un minuto, es decir, es recomendable que ocurran 60 cambios de aire en 1 hora. A pesar de que se están tomando en cuenta solamente 9 ventiladores, el dato anterior muestra que los cambios de aire por hora que se están produciendo fueron mucho más bajos de lo esperado.

Otra forma de observar lo anterior es mediante la tasa de ventilación por ave. Utilizando la ecuación (4) se obtuvo que la tasa de ventilación es de $0,0011 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual estuvo por debajo de la recomendación de $0,0028 \text{ m}^3/\text{s}$ por cada ave.

De acuerdo a los datos de los ventiladores marca Multifan y marca Big Dutchman obtenidos del laboratorio BESS y a los caudales obtenidos de las mediciones de velocidad promedio de descarga, se pudo aproximar las presiones estáticas a las cuales trabajaron los ventiladores. Los cuadros 21 y 22 muestran estos resultados.

Cuadro 21. Presiones estáticas calculadas a partir del ventilador marca Multifan

Número de Ventilador	Caudal (m^3/s)	Presión Estática (kPa)
1	5,50	0,067
2	6,44	0,062
3	6,26	0,065
4	6,37	0,062
5	6,54	0,062
6	5,79	0,065
7	6,55	0,062
8	5,65	0,065
9	6,31	0,065
10	-	-

Cuadro 22. Presiones estáticas calculadas a partir del ventilador marca Big Dutchman

Número de Ventilador	Caudal (m³/s)	Presión Estática (kPa)
1	5,50	0,062
2	6,44	0,057
3	6,26	0,057
4	6,37	0,057
5	6,54	0,057
6	5,79	0,060
7	6,55	0,057
8	5,65	0,060
9	6,31	0,057
10	-	-

De los cuadros anteriores se puede observar que los ventiladores de la nave avícola en estudio están operaron contra presiones estáticas muy altas, provocando que los caudales de trabajo fueron más bajos de lo esperado. Se mencionó anteriormente que las causas de las presiones estáticas en una nave avícola contemplaban el sistema de enfriamiento, los accesorios (como persianas y protectores) y la conducción a lo largo de la instalación.

Las presiones de los abanicos del laboratorio BESS ya contemplan la presión causada por los accesorios que contiene, sin embargo, habría que sumarle la presión que ocasiona el sistema de enfriamiento, que corresponde a aproximadamente 0,012 kPa (0,05 pulgadas de agua) para poder estimar la presión estática en la nave avícola. Por lo tanto, en promedio, los ventiladores estarían trabajando contra presiones estáticas de aproximadamente 0,075 kPa (0,30 pulgadas de agua), tomando en cuenta los componentes adentro de la instalación que provocan un aumento de la presión estática. De lo anterior, es importante destacar que

las naves avícolas tipo túnel más modernas y cerradas con todos sus ventiladores en funcionamiento generalmente operan a una presión estática de 0,037 kPa (0,15" de H₂O) [39]. Es decir, la presión estática adentro de la nave es aproximadamente el doble de lo que debería de ser. La capacidad de movimiento de aire de los ventiladores puede disminuir un 30% o más cuando se trabaja bajo altas presiones estáticas [39].

A medida que aumenta la velocidad del aire en una nave tipo túnel, también aumenta la presión contra la que los ventiladores están trabajando, por lo que el rendimiento de muchos ventiladores (especialmente los más antiguos) pueden sufrir significativamente bajo presiones estáticas altas, donde lo que se busca es tener velocidades de 2,5 m/s adentro de la instalación [40]. Es decir, con base en las curvas características de otros fabricantes los ventiladores en estudio no generaron el caudal esperado, tomando en cuenta también que las velocidades en el interior de la nave fueron más bajas de lo esperado. Esto reafirma que los ventiladores operaron bajo presiones estáticas altas, provocando un mal desempeño de los mismos.

4.6 Eficiencia del sistema de enfriamiento

Como se mencionó anteriormente, se logró medir las temperaturas y las humedades relativas en el sistema de enfriamiento evaporativo (tanto en los paneles de enfriamiento como en el aire exterior). Los resultados de los datos de los sensores se muestran en el cuadro 23:

Cuadro 23. Valores promedios de temperatura y humedad relativa para el cálculo de la eficiencia del sistema de enfriamiento

Posición	Cantidad de Datos	T (°C)	HR (%)
A	4564	28,38	58,30
B	4564	28,30	59,55
C	4564	27,93	60,89
D	4564	28,18	59,56
E	4564	22,14	96,73
F	4564	22,12	94,69
G	4564	22,30	92,72
H	4564	23,93	85,49
I	4564	22,71	92,66
J	4564	22,37	93,09
K	4564	22,07	92,46
L	4564	22,48	94,83
M	4564	22,09	96,04
N	4564	22,36	92,09
O	4564	22,20	93,64
P	-	-	-
Q	4564	21,89	74,66
R	4564	22,04	93,11
S	4564	22,12	92,97
T	-	-	-

Las ubicaciones de estas posiciones se pueden observar en la figura 11. En las posiciones P y T se tuvo problemas con los sensores, por lo que no se pudo obtener los datos correspondientes. Los datos utilizados corresponden únicamente a las horas en los cuales el sistema de enfriamiento estaba en operación, es decir, de 6:00 a.m. a 5:00 p.m. Con base en esos datos, se obtuvo la eficiencia de cada panel de enfriamiento. Se utilizó el promedio de las temperaturas y humedades relativas de las posiciones externas (posiciones A, B, C y D)

y el promedio de cada set de datos de cada panel de enfriamiento. Los resultados se muestran a continuación:

Cuadro 24. Valores promedios de temperatura y humedad relativa para las posiciones externas y las posiciones de cada panel de enfriamiento

Posiciones	Promedio Temperatura (°C)	Promedio Humedad Relativa (%)
A, B, C, D	28,20	59,58
E, F, G H	22,62	92,41
I, J, K, L	22,41	93,26
M, N, O	22,22	93,92
Q, R, S	22,02	86,91

Utilizando la ecuación (5) y la carta psicrométrica (explicado en Anexos), se calcularon las eficiencias de cada panel de enfriamiento evaporativo. El cuadro 25 muestra los resultados obtenidos:

Cuadro 25. Eficiencias de los paneles de enfriamiento evaporativo

Posiciones	Eficiencia (%)
E, F, G H	82,35
I, J, K, L	85,29
M, N, O	89,55
Q, R, S	73,81

Como se puede apreciar en el cuadro 25, las eficiencias de los paneles estuvieron entre un 73% y un 90%. El material del sistema de enfriamiento es celulosa, donde diferentes autores establecen que para este tipo de material, las eficiencias están entre 85-95% [41], 85-90% [42] y 75-90% [43]. Es decir, tres de los paneles de enfriamiento mostraron buenas

eficiencias pero todos los paneles pueden aumentar aún más esos valores, ya que se detectaron la presencia de zonas secas y lugares sucios en los paneles, lo que puede provocar que disminuya el rendimiento de los mismos. En el apartado de Recomendaciones se darán soluciones para poder aumentar la eficiencia del sistema de enfriamiento evaporativo.

4.7 Distancias mínimas con obstrucciones

La nave avícola presentó a su alrededor algunos obstáculos. En el lindero este, existe una pequeña construcción donde se reciben los huevos provenientes de las naves, esta construcción tiene un alto de 4,25 m y un largo de 12,37 m. La distancia real entre esta obstrucción y la nave es de 2,70 m aproximadamente. Utilizando la ecuación (1), se tiene que la distancia mínima recomendada debería ser de 5,98 m. Es decir, esta obstrucción estuvo un poco más de dos veces más cerca que de lo que debería de estar. A pesar de no cumplir con la distancia mínima recomendada, la obstrucción pudo provocar que la velocidad del aire disminuyera. Al estar tan cerca de dos paneles de enfriamiento, la velocidad del aire de entrada al sistema es más baja, esto provoca que la eficiencia de enfriamiento sea mayor [44]. Sin embargo, en las noches cuando levantaban las cortinas para trabajar con ventilación natural, la obstrucción representó un problema debido a que impidió que el aire que se encuentra adentro de la nave (que contiene humedad y gases tóxicos) fuera retirado adecuadamente.

Existe otra nave avícola al lindero oeste de la nave en estudio. Esa otra nave tiene prácticamente las mismas dimensiones, por lo que aplicando la ecuación (1), se tiene que la distancia mínima recomendada es de 25,33 m. La distancia real entre ambas naves es de 18 m, por lo que tampoco cumplió con la distancia mínima recomendada.

En resumen, las obstrucciones que impiden libremente el paso del aire fueron las siguientes (ordenadas en el sentido de cómo el aire entra, atraviesa y sale del recinto):

- Construcción de recibo de huevos y nave avícola aledaña
- Paneles del sistema de enfriamiento evaporativo
- Presencia de jaulas y aves
- Rugosidad de las paredes
- Persianas en los ventiladores
- Protectores de los ventiladores
- Conos de descarga

5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂, velocidad del viento e iluminancia, se determinó que la mayoría de los datos de estas variables no se encuentran en los intervalos adecuados para la edad y la raza de las aves. Estas observaciones se apoyan en algunas conductas de las aves observadas durante las visitas, como jadeo y alas extendidas, los cuales son comportamientos que utilizan para perder calor.

Ni el sistema tipo túnel que opera durante el día ni la ventilación natural proporcionada en las noches lograron las temperaturas, humedades relativas y niveles de concentración de dióxido de carbono recomendadas.

Existe una sobrepoblación de aves en las jaulas, provocando que el aire no fluya adecuadamente adentro de las jaulas. Lo anterior se ratifica con las imágenes tomadas con la cámara termográfica, donde las temperaturas fueron más elevadas de lo recomendado.

En el análisis de conglomerados se comprobó que la nave en su interior no presenta condiciones homogéneas de clima. Aproximadamente en todas las posiciones de la batería central de jaulas, la temperatura fue mayor y la humedad relativa fue menor con respecto a las baterías de jaulas que se encontraban en las zonas laterales.

Se determinó la eficiencia de operación de los cuatro paneles del sistema de enfriamiento, donde se encontraron eficiencias entre 73% y 90%, encontrándose dentro de las eficiencias

adecuadas para el tipo de material. Sin embargo, se detectó la presencia de microorganismos y zonas secas en los paneles.

Los caudales de los ventiladores en la nave fueron menores de lo ideal (13,85 m³/s cada ventilador) y esto se debe a la alta presión estática a la que operaron, ya que trabajaron contra una presión de 0,075 kPa (0,30 pulgadas de agua) aproximadamente.

Durante ventilación forzada, las temperaturas más altas se registraron entre las 9:00 a.m. y la 1:00 p.m. mientras que en la humedad relativa, los datos más elevados se registraron entre la 1:00 p.m. y las 5:00 p.m. La concentración de CO₂ permaneció constante durante el día

Para la ventilación natural, las temperaturas más elevadas se registraron entre las 5:00 p.m. y las 9:00 p.m. mientras que la humedad relativa y la concentración de CO₂ permanecieron prácticamente constantes durante las noches.

La nave tiene un área de sección transversal alta (de 55,4 m²), esto provoca que las velocidades adentro del recinto disminuyan.

Las obstrucciones, que consisten en diferentes construcciones y que están cerca de la nave avícola, no cumplieron con la distancia mínima requerida.

Con base en el análisis realizado, las condiciones ambientales no cumplen con los parámetros climáticos recomendados para la producción y el mantenimiento de las aves, tanto de día (ventilación forzada) como de noche (ventilación natural).

6. RECOMENDACIONES

Acerca de las medidas que puede realizar la empresa:

- 1) Es necesario el hecho de limpiar todos los ventiladores con sus respectivas persianas y protectores. En las diferentes visitas a la nave, se observó que estos componentes se encontraban con mucha suciedad (ver figura 15 en Anexos). Estos elementos sucios provocan que la presión estática contra la cual operan los ventiladores sea más alta. Las persianas sucias provocan una presión estática entre 0,012 kPa y 0,05 kPa (0,05”-0,20” de H₂O), mientras que los protectores provocan una presión estática entre 0,0025 kPa y 0,005 kPa (0,01” y 0,02” de H₂O) [22]. Si las persianas se encuentran sucias, pueden causar una reducción en el flujo del aire de hasta un 30% [44]. Las altas presiones estáticas mayores a 5 kPa (20 pulgadas de agua) provocan que las velocidades en el interior disminuyan en 0,5 m/s y si el estado de los ventiladores no es el adecuado, estas velocidades podrían disminuir aún más [23]. También es importante destacar que las fajas de los ventiladores deben de estar bien firmes y bien colocadas. Si las fajas se encuentran sueltas, pueden causar una reducción en el flujo del aire de hasta un 15% [44].
- 2) La limpieza y el mantenimiento de los paneles de enfriamiento evaporativo es clave. Durante las visitas a la granja, se observaron en algunos paneles zonas secas, es decir, lugares en los cuales el agua simplemente no está humedeciendo el panel (ver

figura 16 en Anexos). Estas zonas secas básicamente son fugas de aire que provocan varios problemas (más adelante se hará énfasis en las fugas). Además de esto, se observó que los paneles estaban muy sucios en algunos sectores (ver figura 17 en Anexos). Si bien es cierto que las eficiencias de los paneles calculadas anteriormente eran altas, realizando un mantenimiento y una limpieza adecuada ayudará a aumentar su eficiencia, provocando que la temperatura en el interior sea menor. Además, el trabajo requerido para succionar aire a través de un panel de enfriamiento que esté sucio puede ser el doble que el trabajo requerido para succionar aire a través de un panel limpio, por lo que aumenta la presión a la cual trabajan los ventiladores [23]. Esto es otro punto muy importante, el cual reafirma la necesidad de tener los paneles de enfriamiento limpios en todo momento.

- 3) Mantener la nave “sellada” es un aspecto importante para tener una ventilación adecuada. No deben existir fugas de aire, se debe mantener la puerta cerrada en todo momento y las cortinas deben de permanecer herméticamente selladas. Las fugas de aire provocan que el aire caliente externo se mezcle con el aire enfriado por el sistema de enfriamiento, echando a perder el trabajo realizado por el sistema. Además, las fugas provocan que la presión estática de la nave aumente. En las visitas realizadas mediante inspección visual se observaron algunas fugas, especialmente en las cortinas laterales (ver figura 18 en Anexos), estas fugas deben ser eliminadas.

- 4) Los deflectores de aire reducen temporalmente el área de la sección transversal de la granja, aumentando así la velocidad del aire en las proximidades del deflector [17]. Los deflectores de aire se extienden desde el techo hasta 2,5-3 m del piso y son utilizados principalmente en casas con áreas transversales relativamente grandes [17]. Muchas de estas instalaciones a menudo requieren casi la misma tasa de intercambio de aire que una instalación con un techo más bajo, pero dado que el área de la sección transversal puede ser un 15% mayor, la velocidad del aire resultante se reduce en un 15% [17]. Sin embargo, si el área de la sección transversal debajo de un deflector es demasiado pequeña, la presión estática aumentará y se reducirá el rendimiento del ventilador [17]. Para evitar estos problemas, se recomienda que los deflectores de aire no se extiendan a menos de 2,5 m del suelo [17]. Además, se ha encontrado que los deflectores funcionan bien si están separados 10 m entre cada uno pero no se deben colocar a más de 15 m debido a que se generan turbulencias de aire, provocando que la eficiencia de los deflectores disminuya [45]. Por lo tanto, se recomienda el uso de deflectores de aire colocados a la altura del sexto nivel de jaulas y separados 10 m entre cada uno.
- 5) El sistema de enfriamiento evaporativo se debe encender o se debe programar para que empiece a trabajar antes de que las aves comiencen a sentirse incómodas por el exceso de calor. Dependiendo de las lecturas de los sensores en el interior de la nave, el panel de control toma decisiones acerca de encender o no el sistema de

enfriamiento, cuando se sobrepasa cierta temperatura. Sin embargo, es recomendable programar el sistema para que funcione cuando se sobrepase una temperatura de 24 °C en el interior. Además, el sistema de enfriamiento evaporativo no debe operar cuando la humedad relativa en el exterior sea superior al 70%, ya que el efecto por enfriamiento sería muy poco y se estaría consumiendo energía eléctrica innecesariamente. Además, altas humedades relativas perjudican el enfriamiento por evaporación de las aves cuando utilizan el tracto respiratorio como mecanismo de pérdida de calor.

- 6) Es necesario reducir la cantidad de aves en cada jaula, ya que la mayoría de las jaulas están sobrepobladas. Es importante destacar que las aves que estén muy juntas pueden ser hasta un 40% menos eficientes perdiendo calor [2].
- 7) Poner en marcha los extractores significa movilizar el aire cerca de las aves durante la noche donde se opera con ventilación natural [7]. Se recomienda poner en marcha los extractores en las noches con el fin de ayudar a reducir la temperatura y a remover la humedad y las altas concentraciones de dióxido de carbono.
- 8) La iluminancia o nivel de iluminación resultó ser muy alto para todas las posiciones donde fue medido y ningún dato estuvo dentro del rango recomendado (5-10 lux).

Las fuentes de luz, la distribución y la duración del período de iluminación pueden afectar el rendimiento, el comportamiento y el bienestar de aves ponedoras [27] [citado en (28)]. Actualmente la nave cuenta con cortinas de color azul que permiten la entrada de la luz solar hacia el interior. Por lo tanto, se recomienda el uso de cortinas negras (opacas) con el fin de excluir la luz externa³.

- 9) Los revestimientos reflectantes en el techo pueden ser eficaces para reducir la temperatura del techo durante los climas calientes. Los revestimientos reflectantes del techo reducen la temperatura del techo principalmente al reflejar la radiación solar lejos del techo. Se ha demostrado que las pinturas reflectantes de techos reducen la temperatura del techo de 5 °C a 32 °C, reduciendo así drásticamente la ganancia de calor a través de las superficies del techo [17] [citado en (46)]. Si bien es cierto que el techo ya cuenta con aislamiento en su parte interior, sería de gran ayuda aplicar un revestimiento reflectivo al techo en su parte exterior.

- 10) El aislamiento reduce en gran medida la transferencia de calor a través de una pared o techo. Las mediciones han demostrado que la densidad de flujo térmico de hasta 30 Watts por metro cuadrado (W/m^2) pasan por los techos más antiguos de las naves avícolas [2]. La efectividad del aislamiento se describe por el valor U (es el recíproco del valor R presentado anteriormente) y entre más bajo sea este valor,

³ Adentro de la instalación se utilizan lámparas tipo fluorescente compacta. No se pudo verificar la iluminancia de las lámparas debido a que es un procedimiento que requiere el uso de un laboratorio de calibración.

mejor. El valor estándar U moderno recomendado es: $U = 0,4 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ o mejor [2]. La instalación actualmente cuenta con aislamiento en el techo, sin embargo, es importante verificar que ese aislamiento cumpla con un valor de U de $0,4 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ o más bajo.

Anteriormente se observó que la presión estática a la cual están operando los ventiladores de la nave en estudio es alta. La idea de algunas recomendaciones anteriores es lograr una mayor tasa de ventilación adentro de la nave avícola para solventar problemas como altas humedades, altas concentraciones de CO_2 y promover un mayor enfriamiento a las aves por el efecto de la velocidad del viento.

Acerca del presente trabajo:

- Repetir este estudio colocando más sensores de temperatura, humedad relativa y especialmente de CO_2 en más posiciones adentro de la nave avícola y en diferentes niveles de jaulas.

- Utilizar sensores de amoníaco (NH_3).

- Tomar datos de velocidad del viento y de iluminancia para cuando la nave esté operando bajo ventilación natural.

- Realizar este análisis para diferentes condiciones climatológicas (realizar un estudio similar durante la época seca).
- Determinar la cantidad de ruido que hay adentro de la nave y verificar que se encuentra por debajo del nivel recomendado de 85 decibeles (dB) [47].
- Medir en diferentes puntos adentro del recinto la presión estática, así como la diferencia de presión que existe tanto en la entrada como en la salida de cada ventilador para determinar qué tan lejos está de su punto de operación.
- Con ayuda de los resultados y conclusiones obtenidos en este trabajo, realizar un estudio en el cual se confirme que las aves sufren de estrés por calor y analizar cómo este y otros parámetros (edad de las aves, nutrición, etc.) afectan en la producción de huevos adentro de la nave avícola.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Avendaño, M. Cada tico consume 200 huevos por año. La Nación [Internet]. San José, Costa Rica: 2015. Disponible en: <https://bit.ly/2H6qutg>
2. DEFRA. Heat stress in poultry – solving the problem [Internet]. Versión 1.0. Londres: Defra Publications; [publicado en marzo 2005, citado el 17 de enero de 2017]. Disponible en: <https://bit.ly/2IYMw79>
3. Lara L.J, Rostagno, M.H. Impact of Heat Stress on Poultry Production. Animals [Internet]. 2013; 3(2):356-369. Disponible en: doi:10.3390/ani3020356
4. St-Pierre NR, Cobanov B, Schnitkey G. Economic losses from heat stress by US livestock industries [Internet]. Journal of Dairy Science. 2003; 86(1): E52–E77. Disponible en: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)74040-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)74040-5)
5. Brenes, F. Los 10 retos de la producción avícola. Productor Agropecuario [Internet]. San José, Costa Rica: 19 enero 2016. Disponible en: <https://bit.ly/2z9rmMo>
6. Zhang, Y., Chen Q, Liu, G., et al. Environment Parameters Control Based on Wireless Sensor Network in Livestock Buildings. Hindawi [Internet]. 2016; 2016(1):1-7. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9079748>

7. Donald, J. Manejo del Ambiente En el Galpón de Pollo de Engorde [Internet]. Aviagen. [publicado en 2009, citado el 17 de enero de 2017] Alabama: 2009. Disponible en: <https://bit.ly/2LJP5rn>
8. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (OMAFRA). Ventilation for livestock and poultry facilities. Ontario: Arlene Robertson; 2010.
9. Czarick M, Fairchild B. Relative humidity...The best measure of overall poultry house air quality - Poultry Housing Tips. Universidad de Georgia [Internet]. Febrero 2012 [citado el 17 de enero del 2017]; 24(2). Disponible en: <https://bit.ly/2JjhUfP>
10. Bustamente E, Guijarro, E, Balasch, S., et al. Multisensor System for Isotemporal Measurements to Assess Indoor Climatic Conditions in Poultry Farms [Internet]. 2012; 12(5): 5752-5774. Disponible en: doi:10.3390/s120505752
11. Czarick, M., Fairchild, B. Average Tunnel Air Velocity - Poultry Housing Tips. Universidad de Georgia [Internet]. 2015 [citado el 9 de marzo del 2017]; 26(4). Disponible en: <https://bit.ly/2LIsj30>
12. Xin H, Acevedo R, Li H, Roberts S. Evaluation of a Flux Chamber for Assessing Gaseous Emissions and Treatment Effects of Poultry Manure. Iowa State University

- ASABE [Internet]. Junio 2009 [citado el 17 de enero del 2017]; 1(1): 2-14.
Disponible en: <https://bit.ly/2xtNgLX>
13. Frejo J.A. Fundamentos del enfriamiento evaporativo para instalaciones avícolas. B.U Manager Munters Spain S.A.U. [Internet]. Junio 2012 [citado el 17 de enero del 2017]; 1(1): 7-11. Disponible en: <https://bit.ly/2J4z2mm>
14. Bisbee, D. Evaporative Cooling. Sacramento Municipal Utility District (SMUD) [Internet]. 2007 [citado el 20 de marzo del 2017]; 633-644.
15. Nortec Condair Group. Cool humidification or indirect evaporative cooling [Internet]. 2018 [citado el 19 de febrero del 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2slZilH>
16. Hy-Line. Entendiendo el estrés por calor en las ponedoras: Consejos de manejo para mejorar el rendimiento del lote en climas cálidos. Hy-Line [Internet]. 2016 [citado el 19 de febrero del 2018]; Disponible en: <https://bit.ly/2kBotwd>
17. CAB International. Poultry production in hot climates. Reino Unido: Nuhad Dagher; 2008.

18. Harmon, J., Xin, H. Choosing fans for livestock and poultry ventilation. Iowa State University [Internet]. 2009 [citado el 28 de marzo del 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2J3FrOy>
19. Casey K.D., Gates, R.S., Wheeler, E.F., et al. On-farm ventilation fan performance evaluations and implications. The Journal of Applied Poultry Research [Internet]. Julio 2008 [citado el 28 de marzo del 2018]; 17(2). Disponible en: <https://bit.ly/2H7E7rX>
20. College of Agriculture & Kentucky Poultry Federation. Poultry production manual. Universidad de Kentucky [Internet]. Estados Unidos: UK Ag Extension 2018. p. 9.2. Disponible en: <https://bit.ly/2kEUmEi>
21. Donald, J. Getting the most from evaporative cooling systems in tunnel ventilated broiler houses. Universidad de Auburn [Internet]. Alabama. p.7. Disponible en: <https://bit.ly/2H7EUcB>
22. Wheeler, E.F. Selecting rated ventilation fans. College of Agricultural Sciences – Pennsylvania State University [Internet]. [citado el 8 de mayo del 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2swrjqa>

23. Czarick, M., Fairchild, B. How Much Do Evaporative Cooling Pads Reduce Air Speed? - Poultry Housing Tips. Universidad de Georgia [Internet]. 2013 [citado el 10 de mayo del 2018]; 25(4). Disponible en: <https://bit.ly/2LNV66a>
24. Salvador Escoda S.A. Manual práctico de ventilación – Catálogo técnico [Internet]. [citado el 28 de marzo del 2018] Barcelona. Disponible en: <https://bit.ly/2J00H7W>
25. Webster, B., Czarick, M. Temperatures and performance in a tunnel-ventilated, high-rise layer house. Applied Poultry Science [Internet]. Marzo 2000 [citado el 17 de enero del 2017]; 9(1): 118-129. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/japr/9.1.118>
26. Timmons, M.B. Improving ventilation in open-type poultry housing. Proceedings of the 1989 Poultry Symposium [Internet]. 1989. Universidad de California.
27. Araújo, F., Garófallo, R., Lima, N., et al. Broiler surface temperature and behavioral Response under two different light sources. Revista Brasileira de Ciência Avícola [Internet]. 2015 [citado el 3 de abril del 2018]; 17(2). Disponible en: <https://bit.ly/2H5cosh>
28. Kristensen, H.H., Prescott, N.B., Perry, G.C., et al. The behavior of broiler chickens in different light sources and illuminances. Applied Animal Behaviour Science [Internet]. 2007; (103):75–89.

29. Hy-Line. Entendiendo la luz en la avicultura: Guía del uso de las luces LED y de otras fuentes de luz para ayudar a los productores de huevo. Hy-Line [Internet]. 2017 [citado el 3 de abril del 2018]; Disponible en: <https://bit.ly/2smegrP>
30. Bhatia, A. Principles of Evaporative Cooling System. PDH Online Course M231 (4 PDH) [Internet]. 2012 [citado el 11 de mayo del 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2kElTWy>
31. Hernández, R., Fernández, C., Baptista, M. Metodología de la investigación. McGraw Hill Education (sexta edición). México: 2014 [citado el 4 de abril del 2018]. p.200. Disponible en: <https://bit.ly/2IuXAsa>
32. Cáceres, J.J. Conceptos básicos de estadística para ciencias sociales. Delta Publicaciones. Madrid: 2007 [citado el 3 de mayo del 2018]. p.47. Disponible en: <https://bit.ly/2kA1cL4>
33. Salcedo, A., Lira, S., González, J., et al. Interpretación de intervalos de confianza por docentes en formación. Venezuela en Latinoamérica Siglo XXI [Internet]. 2011 [citado el 2 de mayo del 2018]; 209-229. Disponible en: <https://bit.ly/2smp0Xf>
34. ISA. Product Guide Alternative Production Systems [Internet]. [citado el 7 de mayo del 2018] Holanda. Disponible en: <https://bit.ly/2xw1qwg>

35. ASABE Standard (American Society of Agricultural and Biological Engineers). EP 344.4 Lighting Systems for Agricultural Facilities. 2014
36. Pedroza, H., Dicovskyi, L. Sistema de análisis estadístico con SPSS. INTA. Managua: 2006 [citado el 3 de mayo del 2018]. p.119. Disponible en: <https://bit.ly/2IZjkr>
37. Dirección General de Estadísticas y Censos (Digestyc). Coeficientes de variación e intervalos de confianza. El Salvador: 2010 [citado el 3 de mayo del 2018]. Disponible en: <https://bit.ly/2MGAHAz>
38. Czarick, M., Fairchild, B. Bird density and its influence on effective temperature - Poultry Housing Tips. Universidad de Georgia [Internet]. 2017 [citado el 5 de mayo del 2018]; 29(5). Disponible en: <https://bit.ly/2IYtlKx>
39. Tabler, T., Wells, J. Fan Selection for Poultry Housing. Universidad de Mississippi State [Internet]. 2016 [citado el 7 de mayo del 2018]; 26(4). Disponible en: <https://bit.ly/2OzbgSy>
40. Czarick, M., Fairchild, B. Older Fans May Not Be Suitable for a Modern Tunnel House - Poultry Housing Tips. Universidad de Georgia [Internet]. 2015 [citado el 10 de mayo del 2018]; 27(3). Disponible en: <https://bit.ly/2xwmxhS>

41. Dubey, P., Patel, A.K. Experimental analysis of various cooling pads in evaporative cooling system. International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology [Internet]. 2015 [citado el 11 de mayo del 2018]; 6(2). Disponible en: <https://bit.ly/2J4xCIr>
42. Ahmed, E.M., Abaas, O., Ahmed, M., Ismail, M.R. Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan. Saudi Journal of Biological Sciences [Internet]. 2011 [citado el 11 de mayo del 2018]; (18). Disponible en: <https://bit.ly/2IZoMQl>
43. Jan Bom, G., Foster, R., Dijkstra, E., et al. Evaporative Air-conditioning: Applications for Environmentally Friendly Cooling. World Bank. Washington DC: 1999 [citado el 11 de mayo del 2018]. p.24. Disponible en: <https://bit.ly/2L72t7Q>
44. Donald, J., Eckman, M., Simpson, G. Keys to getting good performance from your evaporative cooling system. Alabama poultry engineering and economics [Internet]. 2000. Alabama. (5) p.2. Disponible en: <https://bit.ly/2JfmY4P>
45. Donald, J. Tunnel House Air Deflectors/Baffles. Alabama Cooperative Extension System [Internet]. p.1-2. Disponible en: <https://bit.ly/2ssfUHM>

46. Bucklin, R.A., Bottcher, R.W., VanWicklen, G.L., et al. Reflective roof coatings for heat stress relief in livestock and poultry housing. 1993. *Applied Engineering in Agriculture* 9(1), 123–129
47. Cons, R. How to Reduce Negative Effects of Noise on Chickens. *The Poultry Site* [Internet]. 2015 [citado el 16 de mayo del 2018]; 29(5). Disponible en: <https://bit.ly/2O1wmrL>
48. Procesos Bio. Carta Psicrométrica [Internet]. [citado 11 de octubre de 2016]. Disponible en: <https://bit.ly/2IZYvRM>

8. ANEXOS

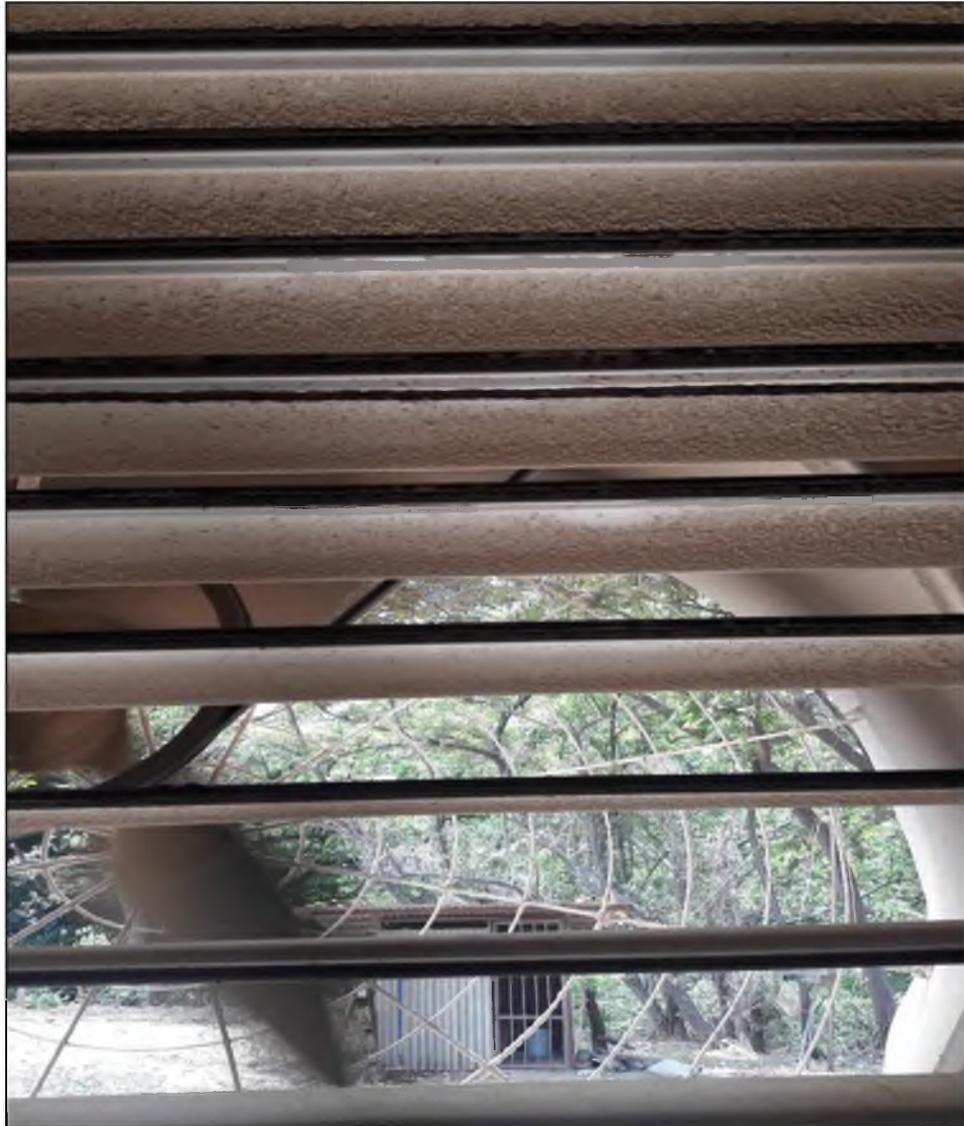


Figura 15. Suciedad en las persianas del ventilador

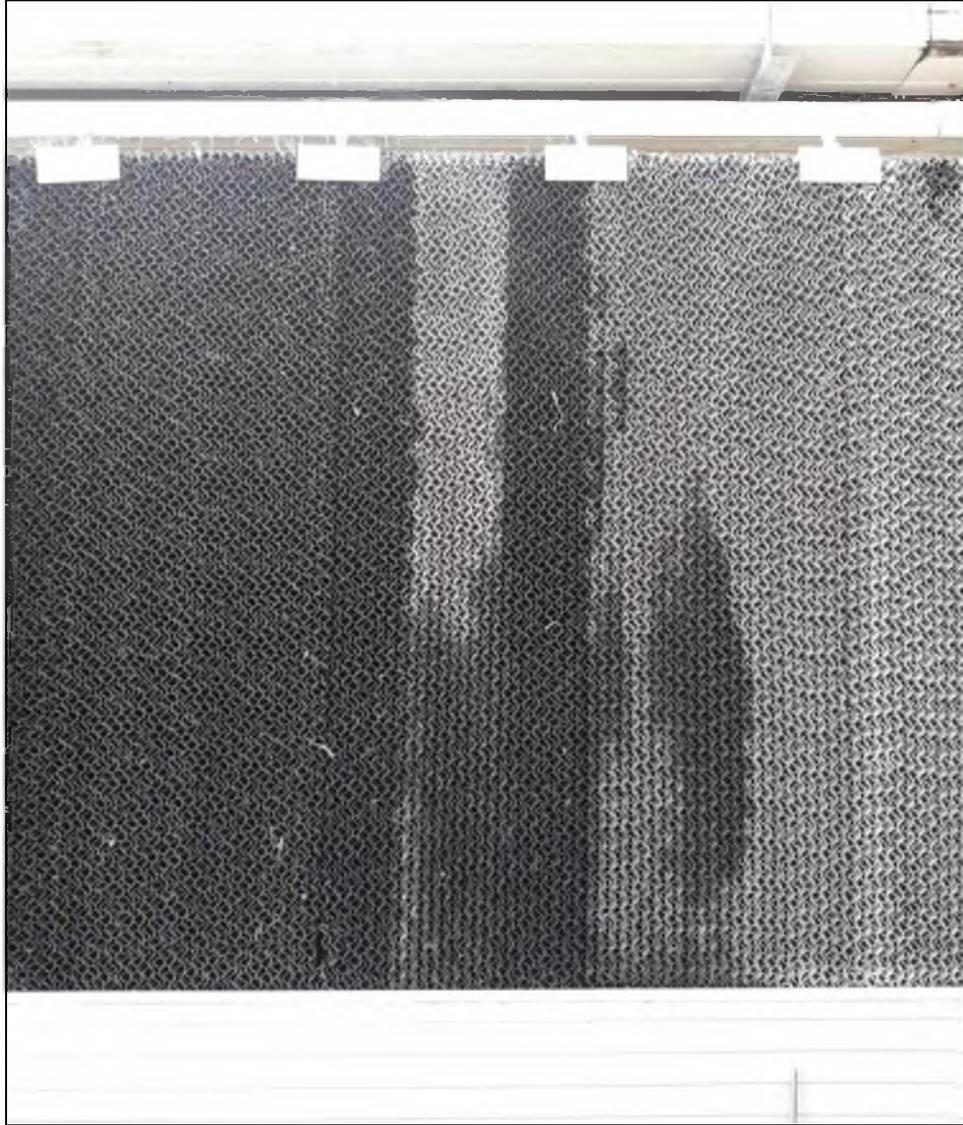


Figura 16. Zonas secas en el panel de enfriamiento



Figura 17. Suciedad en el sistema de enfriamiento



Figura 18. Fugas de aire en la instalación

8.1 Muestra de cálculo

Ventilación:

Capacidad de Ventilación del Túnel: Aplicando la ecuación (2) para la capacidad de ventilación del túnel y tomando en cuenta que la ventilación mínima requerida en sistemas tipo túnel es de 2,5 m/s y que el área de sección transversal de la nave es de 55,4 m² (ancho de la instalación es de aproximadamente 10,66 m mientras que la altura promedio es de 5,2 m) se tiene que:

$$CVT = 2,5 \frac{m}{s} * 55,4 m^2 = 138,5 \frac{m^3}{s}$$

Cambios de Aire: Se utilizó la ecuación (3) para poder obtener los cambios de aire desde adentro de la instalación hacia el exterior. El área transversal es 55,4 m² y el largo de la nave es 110,27 m, por lo que el volumen total de la nave avícola es de 6107 m³. La suma de los caudales de los nueve ventiladores es de 55,41 m³/s que equivale a 199.476 m³/h.

Aplicando la ecuación (3) se tiene que:

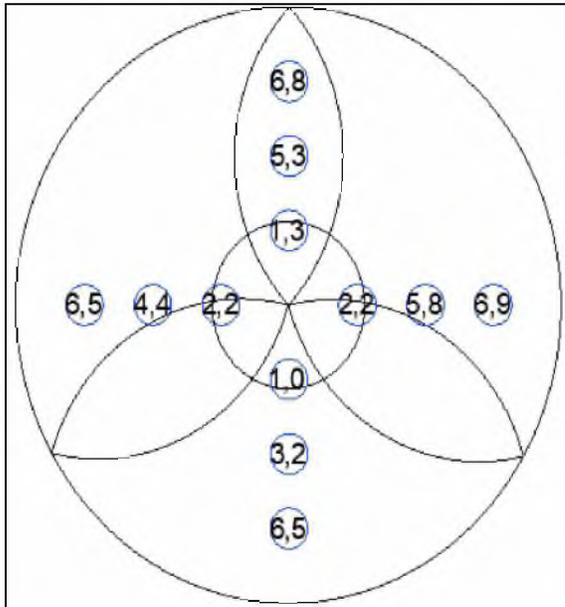
$$Cambios\ de\ aire = \frac{199.476 \frac{m^3}{h}}{6107 m^3} = 32,66 h^{-1}$$

Tasa de Ventilación: Aplicando la ecuación (4), se tiene que la tasa de ventilación es de

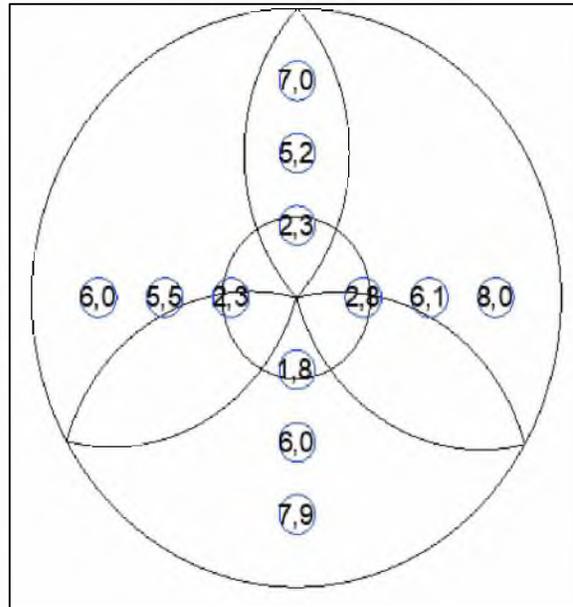
$$Tasa\ de\ Ventilación = \frac{55,41 \frac{m^3}{s}}{50.000\ aves} = 0,0011 \frac{m^3}{s} \text{ por ave}$$

Velocidad de descarga de los ventiladores: Los resultados obtenidos de las velocidades (en m/s) en cada localización para cada ventilador se muestran a continuación:

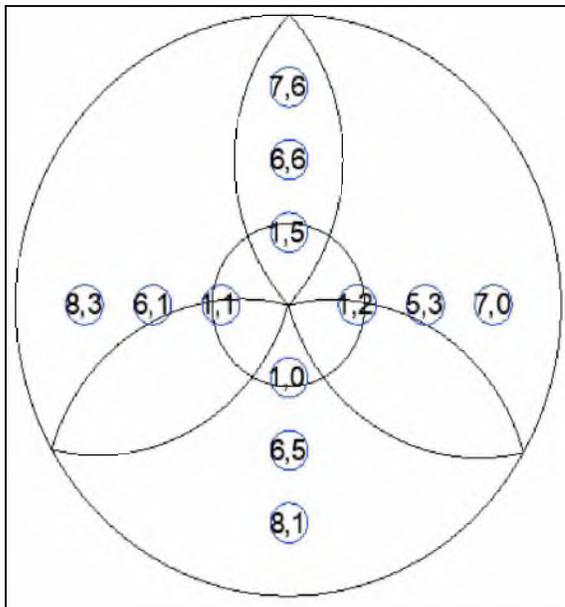
Ventilador #1



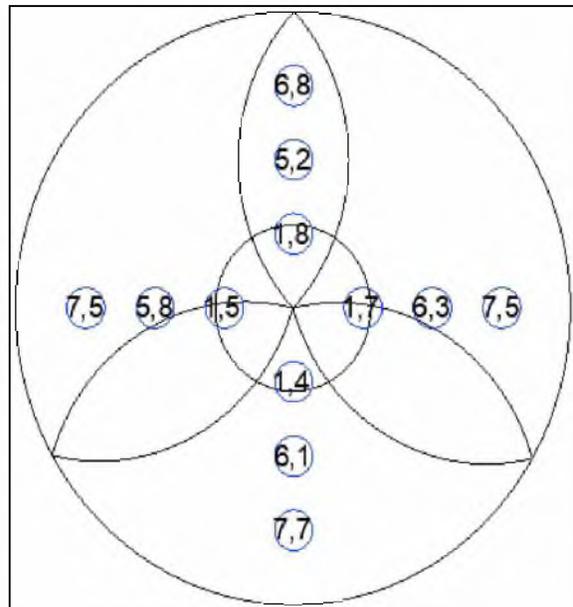
Ventilador #2



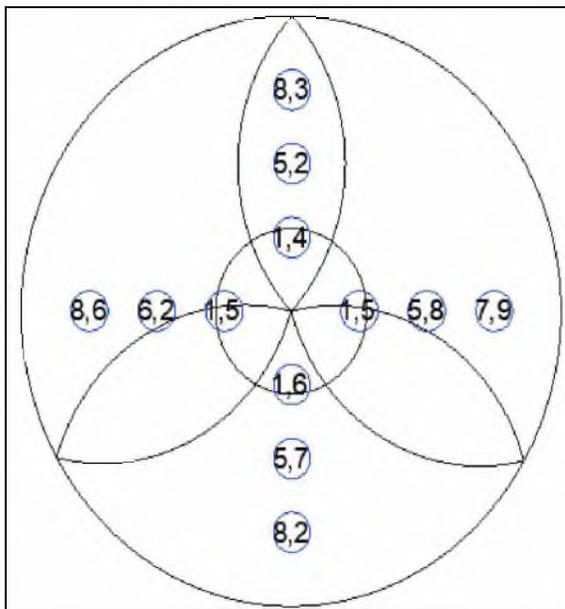
Ventilador #3



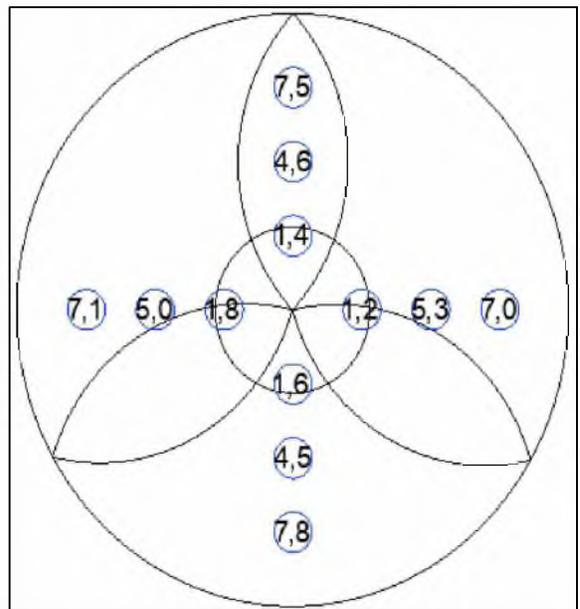
Ventilador #4



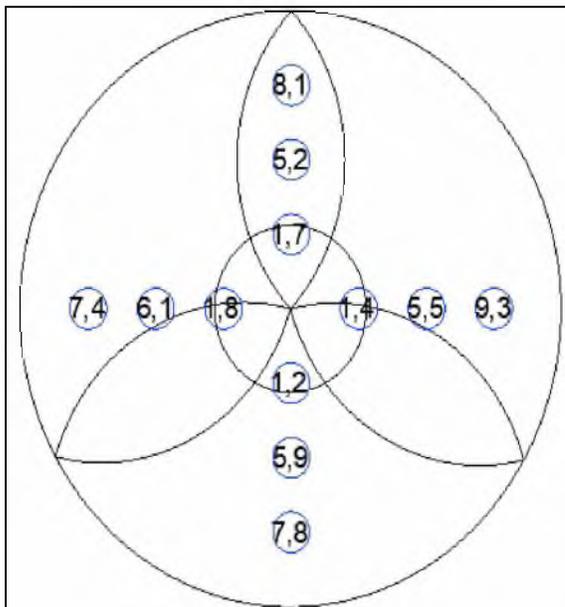
Ventilador #5



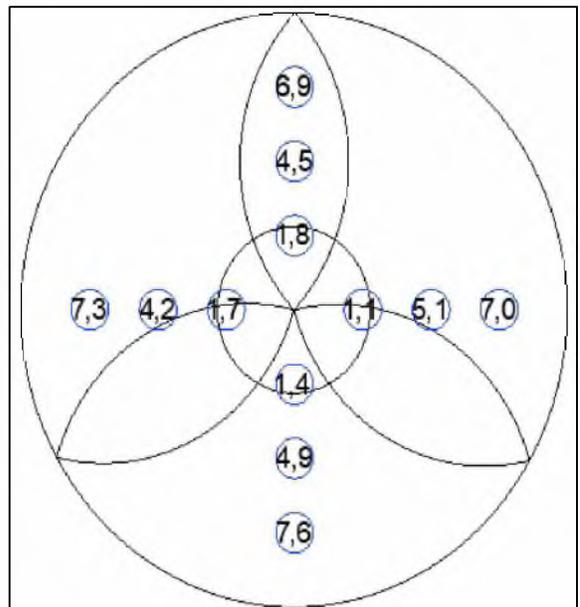
Ventilador #6



Ventilador #7



Ventilador #8



Ventilador #9

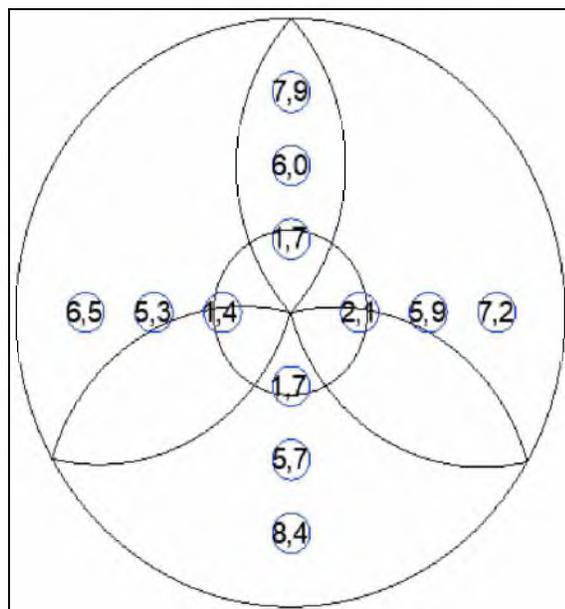


Figura 19. Velocidades de los diferentes ventiladores para cada posición en metros por segundo

Sistema de enfriamiento

Con ayuda de los datos obtenidos y de la carta psicrométrica, fue posible calcular la eficiencia de cada panel de enfriamiento. La eficiencia para uno de los paneles de enfriamiento se muestra a continuación con ayuda de la carta psicrométrica.

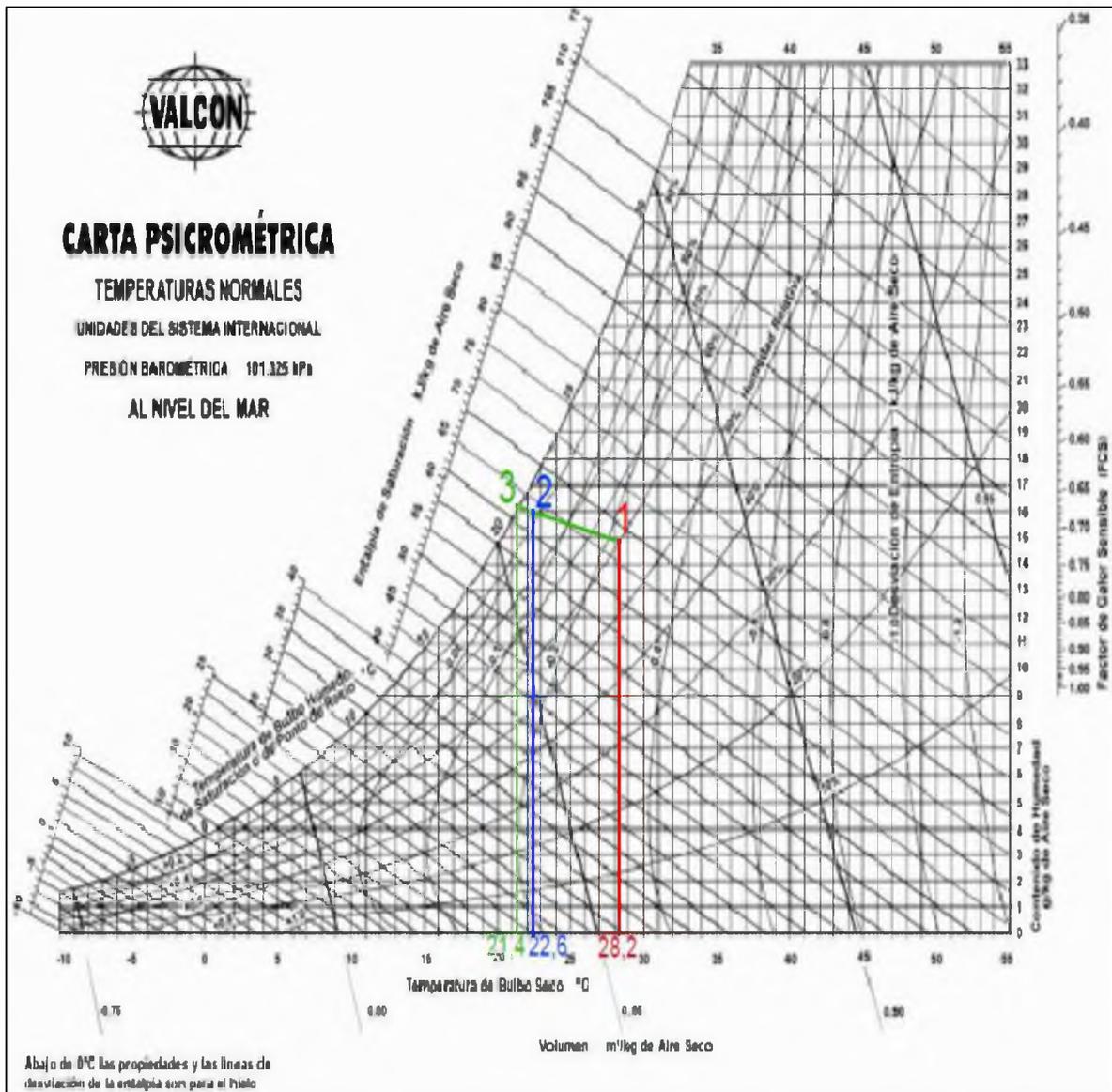


Figura 20. Cálculo de la eficiencia del sistema de enfriamiento para un panel Modificado de [48]

En la figura 20, se pueden observar las diferentes localizaciones de las condiciones externas e internas del aire. Primeramente, se localizaron las condiciones del aire externo por lo que en la línea horizontal de temperatura de bulbo seco, se buscó la temperatura de 28,2 °C. De

ahí, se trazó una línea vertical (en la figura anterior está representada por el color rojo) hasta intersectar con las curvas de humedad relativa, donde se buscó un 59,6% de humedad relativa. Ese punto (número 1) representa las condiciones externas del aire. Se procedió a realizar el mismo procedimiento para las condiciones internas, es decir, después del panel del sistema de enfriamiento (con 22,6 °C de temperatura y 92,4% de humedad relativa). El punto anterior está representado por el número 2, el cual se observa mediante la línea azul. Se trazó una línea que une a los puntos 1 y 2 y se extendió hasta el punto de saturación (punto 3). Esta última línea representa el proceso adiabático que se da una vez que el aire exterior atraviesa la cortina de agua del panel de sistema de enfriamiento evaporativo, ya que no existe un intercambio de calor durante el proceso porque el calor latente aumenta en la misma proporción que disminuye el calor sensible. El punto 3 representaría una eficiencia del sistema del 100%. De ese punto, se trazó una línea vertical (línea verde) para determinar cuál sería la temperatura final si el sistema trabajara con un 100% de eficiencia. Esa temperatura correspondería a la temperatura de bulbo húmedo de la ecuación anterior, ya que durante el proceso, se asume que la temperatura de bulbo húmedo es constante. En el caso anterior, esa temperatura corresponde a 21,4 °C. Por lo tanto, sustituyendo los respectivos valores en la ecuación (2), la eficiencia del panel EFGH es:

$$\eta = \frac{28,2^{\circ}\text{C} - 22,6^{\circ}\text{C}}{28,2^{\circ}\text{C} - 21,4^{\circ}\text{C}} * 100$$

$$\eta_{EFGH} = 82,35 \%$$

Debido a que la carta psicrométrica utilizada es a nivel del mar, se realizaron las correcciones de las propiedades termodinámicas para la elevación a la cual se encuentra la nave avícola, pero como los cambios son pequeños se optó por no tomarlos en cuenta.

Distancias mínimas con obstrucciones

La distancia real entre esta obstrucción y la nave es de 2,70 m aproximadamente. Utilizando la ecuación (1), se tiene que la distancia mínima recomendada debería ser de:

$$D = 0,4 * 4,25 * 12,37^{0,5}$$

$$D = 5,98 \text{ m}$$

Esa otra nave tiene prácticamente las mismas dimensiones, por lo que aplicando la ecuación (1), se tiene que la distancia mínima recomendada es de:

$$D = 0,4 * 6,03 * 110,27^{0,5}$$

$$D = 25,33 \text{ m}$$