



VULNERABILIDAD MULTIAMENAZA EN CONSTRUCCIONES PECUARIAS Y SU IMPACTO EN EL BIENESTAR ANIMAL

Multiple-Threat Vulnerability In Livestock Facilities And Its Impact On Animal Welfare

Johann Fernando Hoyos Patiño¹

 <https://orcid.org/0000-0002-0377-4664>

 jfhoyosp@ufps.edu.co

Adriana Rodríguez Lizcano²

<https://orcid.org/0000-0002-9764-5993> 

adrianarodriguez@ufps.edu.co 

¹Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña (UFPSO)

²Universidad Francisco de Paula Santander Cucuta

RESUMEN

La producción pecuaria enfrenta mayores riesgos ambientales por la intensificación de eventos climáticos extremos, altas temperaturas, humedad elevada y limitada capacidad de adaptación de muchas instalaciones rurales. Esta situación modifica el microclima interno de los alojamientos, compromete la respuesta fisiológica de los animales y afecta la eficiencia productiva. El objetivo del estudio fue analizar la relación entre construcciones pecuarias, vulnerabilidad multiamenaza y bienestar animal en sistemas productivos, con énfasis en ambientes tropicales. El alcance comprendió literatura científica sobre microclima, estrés térmico, diseño de alojamientos, exposición ambiental, mitigación y respuesta animal. Se desarrolló una revisión sistemática de literatura en Scopus, Web of Science y ScienceDirect, mediante ecuaciones relacionadas con alojamiento animal, estrés térmico, riesgo y vulnerabilidad. Se identificaron 428 registros iniciales; luego de eliminar duplicados, aplicar criterios de inclusión y exclusión, revisar títulos, resúmenes y textos completos, se seleccionaron 58 estudios. Los resultados indicaron predominio de investigaciones en bovinos lecheros y una relación estrecha entre temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, radiación solar, densidad animal y diseño constructivo. También se reconoció que las estrategias combinadas de ventilación, sombra, enfriamiento y monitoreo ambiental reducen con mayor eficacia la carga térmica. Se concluye que la evaluación de construcciones pecuarias requiere integrar variables estructurales, ambientales y biológicas; por ello, se propone el Modelo Integrado de Vulnerabilidad Multiamenaza en Construcciones Pecuarias como una aproximación para orientar la valoración del riesgo y la toma de decisiones.

Cómo citar:

Fecha recepción: 10 de Mayo de 2024 / Fecha Aprobación: 30 de Agosto 2024 / Fecha Publicación: 30 de Septiembre 2024

Hoyos Patiño, J. F. & Rodríguez Lizcano, A. (2024). *Vulnerabilidad Multiamenaza En Construcciones Pecuarias Y Su Impacto En El Bienestar Animal*. Revista. FAGROPEC. Vol. 16(2), ppt 92-120. <https://doi.org/10.47847/fagropec.v16n2a6>



Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons (CC BY 4.0).

PALABRAS CLAVES:

Adaptación climática; estrés térmico; microclima; riesgo climático; sistemas productivos.

ABSTRACT

Livestock production faces increased environmental risks due to the intensification of extreme weather events, high temperatures, elevated humidity, and the limited adaptive capacity of many rural facilities. This situation alters the internal microclimate of housing, compromises the animals' physiological response, and affects production efficiency. The objective of the study was to analyze the relationship between livestock buildings, multi-hazard vulnerability, and animal welfare in production systems, with an emphasis on tropical environments. The scope included scientific literature on microclimate, heat stress, housing design, environmental exposure, mitigation, and animal response. A systematic literature review was conducted in Scopus, Web of Science, and ScienceDirect using search terms related to animal housing, heat stress, risk, and vulnerability. A total of 428 initial records were identified; after removing duplicates, applying inclusion and exclusion criteria, and reviewing titles, abstracts, and full-text articles, 58 studies were selected. The results indicated a predominance of research on dairy cattle and a close relationship between temperature, relative humidity, air velocity, solar radiation, stocking density, and building design. It was also recognized that combined strategies of ventilation, shading, cooling, and environmental monitoring most effectively reduce the thermal load. It is concluded that the evaluation of livestock buildings requires the integration of structural, environmental, and biological variables; therefore, the Integrated Multi-Hazard Vulnerability Model for Livestock Buildings is proposed as an approach to guide risk assessment and decision-making.

KEYWORDS:

Climate adaptation; heat stress; microclimate; climate risk; production systems.

INTRODUCCIÓN

La producción agropecuaria actual se desarrolla en condiciones ambientales cada vez más inestables, la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos, variabilidad térmica, periodos prolongados de sequía o humedad y exposición simultánea a amenazas físicas y ambientales obligan a revisar la manera como se diseñan y evalúan las construcciones pecuarias (Ortiz & Hoyos-Patiño, 2023). En los sistemas pecuarios (SP), esta revisión adquiere una importancia particular, la infraestructura no funciona únicamente como espacio de resguardo; también interviene en la regulación del ambiente interno donde los animales comen, descansan, desplazan, producen y expresan su comportamiento, convierte en un punto de unión entre proceso biológico, productivo y ambiental que debe analizarse en conjunto (Hoyos-Patiño, Casadiegos & Carrascal, 2022).

En este tipo de sistemas, el alojamiento influye directamente en el microclima interno; la temperatura (T°), humedad relativa (HR), ventilación, radiación solar, materiales de cubierta, orientación y densidad por m^2 modifican las condiciones reales que experimenta el animal dentro de la instalación. Desde esta visión, el bienestar animal (BA) depende de la integralidad del manejo, alimentación o sanidad y la capacidad del espacio construido para reducir cargas ambientales, favoreciendo respuestas fisiológicas compatibles con la homeostasis (Hoyos-Patiño, 2022; Silanikove, 2000).

En entornos tropicales, esta interacción adquiere importancia particular, las construcciones sirven como protección ante determinados riesgos. Pero cuando no incorporan criterios técnicos con: ventilación, aislamiento térmico o adaptación al clima, favorecer el aumento de T° y HR en espacios interiores (Djamila et al., 2014).

Uno de los aspectos preocupantes en la interacción entre infraestructura, ambiente y respuesta fisiológica animal es el estrés térmico (Ortiz & Hoyos-Patiño, 2023; Romo-Valdez et al., 2022). Este fenómeno se presenta cuando el organismo se someten a una carga de calor superior a su capacidad para disiparla, liberando distintos mecanismos de compensación, como: incremento de frecuencia respiratoria, modificaciones hormonales, disminución consumo de alimento y cambios de comportamiento; esto tiene como finalidad mantener la homeostasis, generalmente ocasionando efectos negativos sobre la productividad, aumento de vulnerabilidad a enfermedades y afectan el BA (Hoyos-Patiño & Hernández-Villamizar, 2022). En escenarios de mayor intensidad, puede poner en riesgo la vida del animal, especialmente en condiciones donde coinciden altos niveles de humedad, poca circulación de aire y falta de sombra o sistemas inadecuados de enfriamiento (Das et al., 2016).

En el ámbito de la ingeniería rural, las construcciones destinadas a la producción pecuaria han evolucionado mediante la incorporación de estrategias enfocadas en el control de las condiciones ambientales, la protección de los animales y el mejoramiento de la eficiencia productiva (Costantino et al., 2021). No obstante, muchos de estos avances aún se abordan de manera fragmentada, priorizando aspectos como la resistencia estructural, sistemas de ventilación, materiales utilizados, orientación de la infraestructura o confort

térmico.

La dificultad aparece cuando dichos factores se evalúan sin considerar de forma conjunta la respuesta biológica del animal y la exposición simultánea a diferentes amenazas ambientales, una instalación puede cumplir adecuadamente con criterios estructurales y, aun así, propiciar ambientes térmicamente inadecuados para el BA. Del mismo modo, el diseño abierto favorece la circulación de aire, incrementando la exposición a radiación solar, precipitaciones o variaciones de clima, esto evidencia la necesidad de comprender el diseño de construcciones pecuarias desde una perspectiva integral, que vaya más allá de la simple funcionalidad física del espacio (Rodríguez-Lizcano & Centeno-Lara, 2016).

La investigación relacionada con el riesgo en las construcciones pecuarias y producción animal aún presenta una marcada desarticulación; mientras algunos trabajos se enfocan principalmente en las amenazas climáticas, otros priorizan el rendimiento productivo o indicadores fisiológicos asociados al estrés (Schauberger et al., 2020).

Existen contribuciones desde la ingeniería, pero con integración limitada del BA como parámetro para evaluar la vulnerabilidad funcional; esto dificulta comprender su importancia para el desarrollo del proceso biológico, donde prestar seguridad y entorno idóneo para los animales. En este contexto, la vulnerabilidad no debería reducirse únicamente a la posibilidad de afectación física de la infraestructura, sino también a la pérdida de la capacidad para conservar condiciones ambientales adecuadas para la salud, comportamiento y desempeño productivo de los animales (Mbutia et al., 2021; Rodríguez-Lizcano, 2010).

Teniendo en cuenta este vacío conceptual y metodológico, esta investigación analiza la interacción entre construcciones pecuarias, vulnerabilidad múltiples amenazas y el BA. El objetivo es estructurar el conocimiento existente acerca del microclima, estrés térmico, diseño de alojamientos y riesgo ambiental, con el fin de sustentar una propuesta integral dirigida a la evaluación de construcciones pecuarias en escenarios de variabilidad climática; proponiendo el Modelo Integrado de Vulnerabilidad Multiamenaza en Construcciones Pecuarias (MIVCP), como una aproximación conceptual y operativa inicial orientada a la integración de la vulnerabilidad estructural y funcional, al contexto de la producción animal y el BA.]

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

Revisión sistemática de literatura enfocada en la interacción entre construcciones pecuarias, vulnerabilidad frente amenazas y el BA dentro de los SP pecuarios, especialmente en ambientes tropicales. Adoptando las etapas generales establecidas en el protocolo PRISMA 2020, con el objetivo de organizar de manera estructurada la búsqueda, depuración, selección e incorporación de publicaciones científicas relacionadas con el entorno construido, estrés térmico y funcionalidad biológica (Barrientos-Monsalve,

Sotelo-Barrios, & Hoyos-Patiño, 2023).

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect. Los registros recuperados fueron organizados en una matriz de Microsoft Excel; posteriormente, se identificaron y eliminaron duplicados mediante coincidencia de título, autores, año y DOI. La escogencia de los estudios fue efectuada por un único revisor, con base en criterios de inclusión y exclusión establecidos previamente. Esta situación constituye una limitación metodológica, ya que la evaluación independiente realizada por varios revisores puede contribuir a disminuir posibles sesgos durante el proceso de cribado y selección de la información.

La estrategia de búsqueda integró términos relacionados con tres núcleos temáticos: infraestructura pecuaria, BA/estrés térmico y riesgo/vulnerabilidad. Se emplearon operadores booleanos y campos específicos de búsqueda, de acuerdo con las posibilidades de cada base.

En Scopus se aplicó la ecuación: TITLE-ABS-KEY (“livestock housing” OR “animal facilities” OR “barn design”) AND TITLE-ABS-KEY (“animal welfare” OR “thermal stress” OR “heat stress”) AND TITLE-ABS-KEY (“risk assessment” OR “vulnerability” OR “multi-hazard”) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2024.

En Web of Science se utilizó: TS=(“livestock housing” OR “animal housing systems”) AND TS=(“animal welfare” OR “heat stress”) AND TS=(“risk” OR “vulnerability” OR “climate risk”), con intervalo 2000–2024 e índices SCI-EXPANDED y SSCI. En

ScienceDirect se aplicó: (“livestock housing” AND “animal welfare” AND “heat stress”) AND (“infrastructure” OR “farm buildings” OR “rural construction”) AND (“risk” OR “vulnerability”). Estas ecuaciones corresponden a las reportadas en la versión inicial del manuscrito y fueron formuladas para recuperar literatura centrada en alojamiento animal, microclima, estrés térmico, vulnerabilidad e infraestructura agropecuaria.

Criterios de inclusión y exclusión

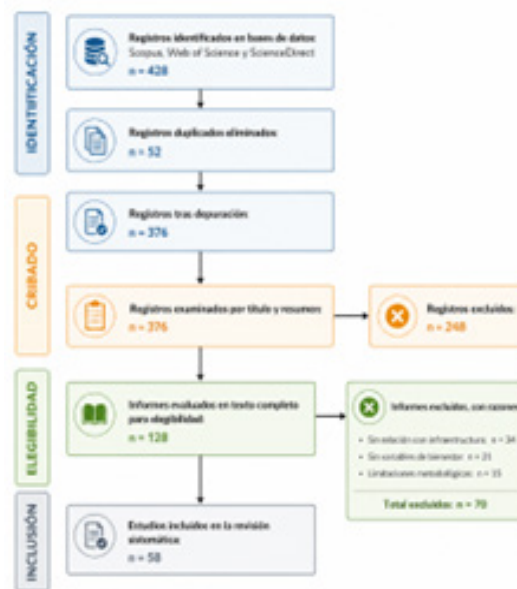
Se seleccionaron artículos científicos indexados publicados entre los años 2014 y 2024, disponibles en idioma inglés o español, vinculados con construcciones pecuarias, sistemas de alojamiento animal, BA, estrés térmico, microclima, riesgo y vulnerabilidad; descartando documentos pertenecientes a literatura gris, informes técnicos no indexados, tesis sin publicación académica formal, investigaciones sin relación directa con SP animal y artículos sin acceso a texto completo.

Selección de estudios

En la fase inicial de búsqueda se obtuvieron 428 registros provenientes de las tres

bases de datos consultadas. Posteriormente, se eliminaron 52 documentos duplicados, dejando un total de 376 registros para la revisión de títulos, resúmenes y palabras clave; durante el proceso se excluyeron 248 estudios debido a no tener relación directa con los temas de la investigación. Más adelante, se realizó la evaluación a texto completo de 128 documentos; de ellos, 70 fueron descartados por no cumplir con los criterios de elegibilidad o por no aportar información suficiente para la matriz de extracción de datos. Finalmente, la revisión sistemática quedó conformada por 58 estudios.

El proceso se desarrolló en cuatro fases, conforme al modelo PRISMA:



Extracción y análisis de la información

De cada estudio se registró información correspondiente al autor, año de publicación, país o cobertura geográfica, especie o sistema productivo analizado, variable principal de estudio, indicador ambiental o de bienestar, estrategia de mitigación empleada y principal hallazgo identificado. Con base en esta matriz de información, los documentos fueron organizados en cinco categorías de análisis: microclima e infraestructura, estrés térmico, diseño de alojamientos, evaluación del riesgo y estrategias de mitigación. Esta estructura de clasificación se mantiene en la organización temática del manuscrito, en el cual los 58 estudios seleccionados fueron resumidos de acuerdo con la especie evaluada, el sistema productivo, la variable principal y los hallazgos más relevantes.

El análisis de la información se desarrolló mediante una síntesis narrativa y una comparación temática, considerando la diversidad existente entre las especies estudiadas, los enfoques metodológicos, los indicadores ambientales y los tipos de infraestructura reportados en la literatura. No se realizó un metaanálisis debido a que los estudios seleccionados no presentaban unidades de medida comunes ni diseños experimentales con suficiente

homogeneidad. En consecuencia, la interpretación de los resultados estuvo dirigida a reconocer patrones, relaciones y vacíos de conocimiento entre el desempeño físico de las construcciones, la exposición ambiental y la respuesta biológica de los animales.

Alcance metodológico y limitaciones

La revisión reunió aportes provenientes de áreas que habitualmente se estudian de manera independiente, entre ellas el BA, la ingeniería rural, el estrés térmico, el microclima y la evaluación del riesgo. Esta integración permitió estructurar variables de tipo ambiental, funcional y constructivo asociadas con la vulnerabilidad de las construcciones pecuarias. Sin embargo, el estudio también presenta algunas limitaciones metodológicas. La búsqueda bibliográfica se limitó a tres bases de datos, el proceso de cribado estuvo a cargo de un único revisor y no fue posible aplicar una escala cuantitativa unificada para evaluar el riesgo de sesgo, debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos en la revisión.

RESULTADOS

Los 58 estudios seleccionados mostraron una amplia diversidad geográfica, con predominio de investigaciones enfocadas en sistemas bovinos lecheros y en variables relacionadas con el estrés térmico, el microclima y la infraestructura pecuaria. En la Tabla 1 se presentan de manera resumida las principales características de los estudios incluidos en la revisión.

Tabla 1.
Síntesis de estudios seleccionados sobre construcciones pecuarias, microclima y BA

Autor	Año	País	Especie / Sistema	Variable principal	Hallazgo relevante
West	2003	EE. UU.	Bovino lechero	Estrés térmico	Reducción de leche, consumo y fertilidad.
Bernabucci et al.	2010	Italia	Bovino	Adaptación metabólica	Cambios endocrinos y fisiológicos ante calor.
Polsky & von Keyserlingk	2017	Canadá	Bovino lechero	Bienestar	El calor compromete conducta y salud.
Becker et al.	2020	EE. UU.	Bovino lechero	Fisiología	Aumento respiración y temperatura corporal.
Mylostyyvi et al.	2020	Ucrania	Bovino	Microclima	Dependencia del ambiente externo.
VanderZaag et al.	2023	Canadá	Bovino	Galpones	Diferencias térmicas interior-exterior.
Reuscher et al.	2023	EE. UU.	Bovino	Velocidad aire	Mejora disipación térmica.
Witkowska et al.	2020	Polonia	Bovino	Calidad aire	Cambios según alojamiento.
Song et al.	2023	China	Bovino	Humedad	Afecta producción y conducta.
Arcidiacono	2018	Italia	Multiespecie	Soluciones energéticas	Tecnologías para mitigación térmica.

Shin et al.	2022	Corea	Pecuario	Ventilación inteligente	Optimiza ambiente interno.
Shin et al.	2024	Corea	Pecuario	THI-control	Ventilación automatizada eficaz.
Parois et al.	2018	Francia	Cerdas	Piso refrigerado	Menor frecuencia cardiaca.
Toledo et al.	2022	Brasil	Bovino	Manejo cálido	Disminuye pérdidas productivas.
Salama et al.	2014	España	Caprino	Adaptación calor	Variabilidad fisiológica.
Sejian et al.	2018	Internacional	Multiespecie	Adaptación	Costos energéticos del estrés.
Johnson	2018	Australia	Multiespecie	Mitigación	Requiere manejo integrado.
Cartwright et al.	2022	Reino Unido	Bovino	In vivo heat challenge	Cambios fisiológicos por calor.
Cheng et al.	2024	China	Pecuario	Confort térmico	Nuevos métodos de detección ambiental.
Cook	2021	EE. UU.	Bovino	Housing welfare	Diseño del alojamiento mejora bienestar.
Das et al.	2016	India	Multiespecie	Heat stress impact	Afectación global del rendimiento.
Da Silva	2018	Brasil	Bovino	Climate change	Estrategias de adaptación pecuaria.
Bigir	2023	Europa	Pecuario	Microclima housing	Diseño digital del microclima.
Rodríguez	2023	Latinoamérica	General	Vulnerabilidad	Base conceptual exposición-capacidad.
El-Emam & Hamam	2024	Egipto	General	Risk systems	Integración sistémica de indicadores.

Se identificó un predominio de estudios realizados en bovinos lecheros pertenecientes a sistemas intensivos y menos intensivos, destacándose una tendencia creciente hacia el uso de sensores ambientales, índices de estrés térmico y estrategias orientadas a la mitigación de las condiciones climáticas adversas.

La información obtenida a partir de los 58 estudios incluidos en la revisión fue organizada en categorías analíticas, definidas con base en la recurrencia temática, relación conceptual entre investigaciones y contribución al propósito principal del estudio.

Microclima e infraestructura

En esta se agruparon investigaciones orientadas al análisis de la interacción entre el diseño de las construcciones pecuarias y condiciones ambientales presentes en su interior; los estudios mostraron que factores como altura de la cubierta, orientación frente a la radiación solar, ventilación natural, materiales y tipo de techo influyen de manera importante sobre la temperatura interna, humedad relativa y acumulación de gases. En bovinos lecheros, diferentes investigaciones reportaron que los establos con ventilación limitada o con cubiertas metálicas carentes de aislamiento favorecen el incremento de la carga térmica dentro de las instalaciones (Mylostyvyi et al., 2020; VanderZaag et al., 2023). De igual forma, se observó que la implementación de sistemas automatizados de ventilación contribuye a mejorar la estabilidad del microclima y las condiciones de confort para los animales (Shin et al., 2022).

Estrés térmico

Esta categoría incluyó estudios enfocados en las respuestas fisiológicas, productivas y conductuales asociadas a la exposición de los animales a altas temperaturas. La información mostró consenso en considerar el estrés térmico como una de las principales amenazas funcionales para los SP ubicados en regiones tropicales y de clima cálido templado. Entre los efectos más reportados se encontraron el aumento de frecuencia respiratoria, elevación de la temperatura corporal, jadeo, disminución en el consumo voluntario de alimento y reducción en la producción de leche cuando el índice temperatura-humedad (THI) supera niveles considerados críticos (West, 2003; Polsky & von Keyserlingk, 2017). Esta información, consolida al THI como uno de los principales indicadores para monitorear las condiciones ambientales en producción animal.

Diseño de alojamientos

Los sistemas abiertos en construcciones pecuarias, presentan ventajas en términos de ventilación, facilitando la manifestación de comportamientos naturales; no obstante, incrementaron la exposición a la radiación solar, precipitaciones y variaciones climáticas (Molina-Benavides et al., 2023). En contraste, los sistemas cerradas o semicerradas brindan mayor protección física frente al ambiente externo, aunque presentan mayor riesgo de acumulación de calor, cuando no disponían de sistemas de ventilación adecuados (Centurión et al., 2014). En conjunto, la evidencia muestra que no existe un modelo de alojamiento aplicable a todos los contextos, existen alternativas que dependen de las condiciones climáticas, especie animal y nivel tecnológico disponible.

Evaluación de riesgo

Se identificaron estudios enfocadas en la vulnerabilidad, resiliencia y análisis integral del riesgo; mostrando que gran parte de los estudios convencionales analizan de forma independiente las amenazas estructurales y ambientales, sin considerar variables biológicas relacionadas con el animal (Vieira et al., 2019). En contraste, enfoques más recientes proponen integrar componentes como exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa dentro de la evaluación del riesgo (Rodríguez, 2023; El-Emam & Hamam, 2024). Esta limitación respaldó la formulación del modelo MIVCP como propuesta orientada a la integración de los diferentes factores de vulnerabilidad presentes en los SP.

Estrategias de mitigación

Se reunieron estudios enfocados en estrategias destinadas a disminuir los efectos del calor y fortalecer la resiliencia productiva de los SP, se reportan resultados asociados al uso de ventiladores, sistemas de nebulización, pisos refrigerados, sombreado natural y control de densidad. En porcinos, se identificó que pisos enfriados contribuyen a reducción de la frecuencia cardíaca y favoreciendo un mejor comportamiento de cerdas en ambientes cálidos (Parois et al., 2018). En bovinos se identificó que el aumento en la velocidad del aire disminuye varias respuestas fisiológicas vinculadas con el estrés térmico (Reuscher

et al., 2023). En términos generales, la evidencia indica que las estrategias combinadas generan mejores resultados que la aplicación de medidas aisladas.

El análisis permitió reconocer que la vulnerabilidad de las construcciones pecuarias es consecuencia de la interacción entre infraestructura, condiciones ambientales y respuesta biológica de los animales. Estas categorías definidas demuestran que el BA no depende únicamente del manejo zootécnico, sino también del comportamiento térmico y funcional de las construcciones, esta organización temática sirvió como base para la formulación del modelo MIVCP.

Infraestructura y microclima en construcciones pecuarias

El microclima presente en las construcciones pecuarias representa el principal vínculo entre entorno físico y BA, entendiéndolo como el conjunto de condiciones ambientales y térmicas generadas al interior de la construcción a partir de la interacción de factores externos, como clima, y factores internos con diseño estructural, manejo y densidad animal.

Diversas investigaciones concuerdan en señalar que las variables determinantes en la configuración del microclima son temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y radiación solar, ya a que actúan de manera integrada sobre el confort térmico de los animales (Cheng et al., 2024; Molina-Benavides et al., 2023 y Cerqueira et al., 2016). Este enfoque multivariable permitió descartar evaluaciones limitadas únicamente a temperatura, reconociendo que el bienestar térmico depende de la interacción dinámica entre diferentes factores ambientales.

Desde el punto de vista estructural, aspectos como: ventilación, materiales de construcción, orientación de la construcción y densidad, influyen directamente en la capacidad de disipación de calor y regulación de condiciones internas. Entre estos elementos, la ventilación natural o mecánica, se identifica como mecanismo relevante para el control del microclima, incrementando el intercambio de aire y disminución T° y HR dentro de la construcción (Wu, 2005; Shin et al., 2022).

En sistemas con ventilación natural, las condiciones internas dependen en gran medida del comportamiento climático externo, incrementando la vulnerabilidad frente a escenarios de T° elevadas (Mylostyvyi et al., 2020). En contraste, sistemas con ventilación controlada mantiene ambientes internos estables, requiriendo mayor consumo energético para su funcionamiento.

Modificaciones estructurales relativamente sencillas, como aumentar la altura del techo, incorporar ventilación laterales o uso de materiales con propiedades aislantes, produce mejoras significativas en el microclima interno (Firfiris et al., 2019). Con este enfoque, la construcción pasa de componente pasivo, a componente activo en la regulación ambiental de los SP.

Otro aspecto es el diseño, si es inadecuado favorece acumulación de calor sensible y

latente, incrementa la carga térmica, generando condiciones de desconfort que afectan la eficiencia productiva, como se observa en la figura 1. En consecuencia, la falta de control microclimático reduce la capacidad del animal para conservar el equilibrio fisiológico (Kochetova et al., 2021; Kiktev et al., 2021).

Figura 1.

Interacción entre la infraestructura, el microclima y el bienestar animal.



Figura 1. Modelo conceptual del efecto del diseño estructural sobre el microclima, la respuesta fisiológica y el bienestar-productividad

El diagrama muestra la relación secuencial entre el diseño estructural de las instalaciones, considerando materiales, ventilación y orientación, y la formación del microclima interno, caracterizado por la temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y radiación.

Este microclima condiciona la respuesta fisiológica de los animales, especialmente los mecanismos de termorregulación y metabolismo, que determinan el nivel de bienestar y la productividad del sistema.

Estrés térmico como eje central del riesgo

El estrés térmico se sitúa como el principal factor de vulnerabilidad en SP, es el eje central entre infraestructura, ambiente y BA. El índice temperatura-humedad (THI) se consolida como el indicador relevante para evaluar estrés térmico, integrando variables ambientales clave (Vega et al., 2014; López-Quiñonez et al., 2021). Se identifica que valores superiores a 72 indican condiciones de estrés en bovinos, aunque este umbral varía según especie y SP.

Las respuestas fisiológicas del animal al estrés térmico incluyen: aumento en frecuencia respiratoria, vasodilatación periférica, reducción en el consumo de alimento, aumento en el consumo de agua y alteraciones hormonales; todo esto busca mantener la homeostasis, implicando costo energético que reduce la eficiencia productiva. De manera complementaria, el estrés térmico compromete la función inmunológica y aumentando la susceptibilidad a enfermedades (Das et al., 2016).

La literatura reciente confirma que el incremento de la temperatura global está intensificando la frecuencia y severidad de episodios de estrés térmico en SP (Vega et al., 2014; López-Quiñonez et al., 2021) . Este fenómeno adquiere especial relevancia en sistemas intensivos, donde la densidad animal y la limitada ventilación pueden amplificar sus efectos, figura 2.

Desde la ingeniería, se han desarrollado múltiples estrategias para mitigar el estrés térmico, incluyendo sistemas de ventilación, enfriamiento evaporativo y automatización del control ambiental. Sin embargo, su implementación sigue siendo limitada en sistemas de producción tradicionales.

Figura 2.
Comportamiento dinámico del estrés térmico.



Bienestar animal y sistemas de alojamiento

El BA está intrínsecamente ligado a las características del sistema de alojamiento. La evidencia científica demuestra que factores como el espacio disponible, el tipo de suelo, la ventilación, la iluminación y el acceso a sombra influyen directamente en el comportamiento, la salud y la productividad de los animales.

En sistemas bovinos, por ejemplo, se ha evidenciado que modificaciones en el diseño del alojamiento como: uso de sombra, ventilación adecuada y enriquecimiento ambiental,

mejoran significativamente los indicadores de bienestar, incluyendo comportamiento y parámetros fisiológicos (Park et al., 2020).

No obstante, los sistemas abiertos, aunque favorecen la ventilación y permiten la expresión de comportamientos naturales, también incrementan la exposición a condiciones climáticas adversas, generando una compensación entre la protección ambiental y el bienestar etológico. En efecto, se ha demostrado que los sistemas de alojamiento abiertos mejoran la calidad del aire y promueven el comportamiento natural, pero simultáneamente exponen a los animales a radiación solar y condiciones climáticas extremas, lo cual puede incrementar el estrés térmico (Mayorga et al., 2019). Asimismo, el tipo de sistema de alojamiento influye directamente en el ambiente interno y en la concentración de gases, condicionando el BA (Witkowska et al., 2020).

Si bien la ventilación representa uno de los mecanismos más importantes para favorecer la disipación del calor, su eficiencia está condicionada por el diseño estructural de las instalaciones y, en algunos casos, puede aumentar la exposición de los animales a factores ambientales externos (Mondaca, 2019; Toledo et al., 2022). En consecuencia, el diseño de las construcciones pecuarias debe orientarse hacia soluciones integrales que permitan equilibrar la ventilación con la protección frente a condiciones ambientales adversas, buscando optimizar de manera simultánea el confort térmico y el rendimiento productivo (Macrae, 2024).

Investigaciones recientes también han evidenciado que condiciones micro climáticas desfavorables, incluso dentro de rangos considerados moderados, pueden inducir estrés y alterar el comportamiento animal. Un ejemplo de ello ocurre en ambientes con elevada humedad relativa, donde puede presentarse disconfort térmico aun cuando las temperaturas no sean excesivamente altas (Song et al., 2023).

Variables críticas que determinan la vulnerabilidad

El análisis de la literatura permitió identificar un conjunto de variables críticas que determinan la vulnerabilidad en construcciones pecuarias. Estas variable no actúan de manera aislada, interactúan conformando el nivel de estrés ambiental, tabla 2.

Tabla 2.
Variables críticas que determinan la vulnerabilidad

Variable	Descripción	Efecto sobre la vulnerabilidad
Temperatura (T°) del aire	Factor relevante en el balance térmico del animal. T° elevadas incrementan carga térmica y activan mecanismos de termorregulación (Bernabucci, et al, 2010; Polsky & von Keyserlingk, 2017).	Aumenta el riesgo de estrés térmico y reduce la eficiencia productiva.

Humedad relativa (HR)	Modifica la capacidad de evaporación del calor corporal. Altos niveles de HR reducen eficiencia de disipación térmica (Das et al., 2018; García-Ispierto et al., 2007; Herbut et al., 2018).	Limita la pérdida de calor por evaporación, intensificando el desconfort térmico.
Velocidad del aire	Favorece la convección y la evaporación. La ventilación adecuada reduce significativamente el estrés térmico (Reuscher et al, 2023).	Mejora la disipación de calor y disminuye la vulnerabilidad ambiental.
Radiación solar	Incrementa la carga térmica directa sobre el animal y las superficies de la construcción (Schütz et al., 2009; Tucker, Rogers & Schütz, 2008).	Eleva la temperatura interna y la exposición al calor radiante.
Densidad animal	Afecta la generación de calor metabólico y la calidad del aire, incrementando la vulnerabilidad en sistemas intensivos (Salama et al., 2014; Cook, 2021).	Aumenta la acumulación de calor y deteriora el confort térmico.

Fuente: Los Autores.

Esta interacción determina el nivel de confort o estrés térmico, el enfoque multivariable es fundamental para entender la dinámica del microclima, figura 3.

Figura 3.
Relación entre variables críticas del sistema.

Figura 3. Factores ambientales que influyen en el índice de temperatura y humedad (THI) y el estrés térmico



El nuevo enfoque para la evaluación del BA debe integrarse con el diseño del entorno construido, reconociendo su importancia clave en la producción animal.

DISCUSIÓN

La vulnerabilidad en las construcciones pecuarias constituye un factor de naturaleza multidimensional, cuya interpretación integra la estabilidad física de las estructuras

incorporando el BA como variable de análisis, reconociendo la funcionalidad biológica de las construcciones como componente relevante.

Las construcciones pecuarias deben entenderse como elementos no estáticos, convirtiéndose en sistemas dinámicos capaces de regular el microclima interno, influyendo directamente sobre la respuesta fisiológica del animal. Estas condiciones internas están condicionadas por el diseño estructural, especialmente en sistemas con ventilación natural (Mylostyvyi et al., 2020). Incrementando la exposición al riesgo, en ambientes con alta variabilidad climática.

En este contexto, el estrés térmico se ubica como el principal punto de interacción entre infraestructura, ambiente y producción animal, es un fenómeno multifactorial que repercute sobre la fisiología, comportamiento y rendimiento productivo del animal, aspecto ampliamente documentado (Cartwright et al., 2022; González-Rivas, 2020; Parois et al., 2020; Johnson, 2018). La combinación de todos estos factores, genera condiciones de discomfort capaces de alterar la homeostasis (Correa-Calderón et al., 2022; Becker et al., 2020; Barragán-Hernández et al., 2015).

Desde la fisiología, el animal activa mecanismos adaptativos orientados a la disipación de calor, como el jadeo, sudoración, vasodilatación periférica y modificaciones conductuales (Togoe et al., 2024). Generando costo energético considerable (Sejian et al., 2018). Se presenta entonces una contradicción funcional: los mecanismos adaptativos favorecen la supervivencia, pero reducen la eficiencia productiva del animal.

En relación con la ingeniería aplicada a las construcciones pecuarias, las estrategias de mitigación deben integrar diseño estructural y manejo del ambiente interno (Shin et al., 2024). La ventilación aparece como mecanismos para el control térmico, favoreciendo la disipación de calor mediante procesos de convección y evaporación (Bjerg, 2023). El aumento de la velocidad del aire disminuye la temperatura corporal y la frecuencia respiratoria en bovinos, contribuyendo a mejorar el confort térmico (Reuscher et al., 2023). Del mismo modo, tecnologías como evaporadores y sistemas automatizados de control ambiental, muestran resultados efectivos en la reducción del estrés térmico (Arcidiacono, 2018).

Una de las principales limitaciones identificadas corresponde a la independencia de los estudios realizados; la mayoría analizan variables de manera separada, como ventilación o temperatura, sin incorporar enfoques multiamenaza que integren conjuntamente factores estructurales, ambientales y biológicos. Esto dificulta el diseño de soluciones integrales limitando la efectividad de las estrategias de mitigación implementadas en los SP.

Por otra parte, la vulnerabilidad no está determinada únicamente por las condiciones físicas del entorno, las características intrínsecas de los animales también influyen, entre ellas la genética, edad, estado productivo y capacidad adaptativa (Menéndez-Buxadera et al., 2020; Herbut et al., 2018). Estos influyen directamente en la respuesta frente al estrés térmico e introducen una dimensión biológica que se debe incorporar al diseño y evaluación de las construcciones pecuarias. En consecuencia, valorar el riesgo requiere

un enfoque sistémico que integre condiciones ambientales, estructurales y características biológicas del animal.

CONTEXTO COLOMBIANO

En el caso colombiano, la vulnerabilidad de las construcciones pecuarias se incrementa por la convergencia de factores estructurales, climáticos y productivos que generan un contexto de elevada exposición al riesgo. Estructuralmente, es frecuente el empleo de materiales locales y métodos constructivos desarrollados de manera empírica, situación que reduce la capacidad de las instalaciones para responder adecuadamente ante condiciones ambientales extremas (Romero-Hernández et al., 2024). Como consecuencia, el microclima interno suele reproducir e incluso intensificar las condiciones climáticas externas, aumentando la carga térmica sobre los animales (VanderZaag et al., 2023).

Colombia presenta condiciones climáticas propias de la zona tropical (Bedoya-Soto et al., 2024). Favoreciendo la presencia de estrés térmico, especialmente en regiones de baja altitud, la combinación de T° y HR disminuye la capacidad de disipación del calor corporal, incrementando el riesgo en el animal (Das, 2018). En cuanto al componente productivo, el bajo nivel de tecnificación de numerosos SP representa un factor clave de vulnerabilidad funcional (Ortiz-Bobea et al., 2021).

La limitada incorporación de tecnologías para el control ambiental, limita la capacidad de adaptación frente a eventos climáticos extremos. Esta problemática resulta particularmente crítica en sistemas semiintensivos (Morgado et al., 2023; Goo et al., 2019).

Colombia no cuenta con una herramienta que permitan analizar de forma conjunta la vulnerabilidad estructural, la exposición a múltiples amenazas y el BA, dificultando el proceso de toma de decisiones para implementar estrategias efectivas de adaptación y mitigación.

Por esta razón, se hace necesaria la formulación de un modelo contextualizado, como el MIVCP propuesto en esta investigación, capaz de integrar variables estructurales, ambientales y biológicas para lograr una evaluación precisa del riesgo. Un enfoque de esta naturaleza contribuye al fortalecimiento del BA y fortalece la resiliencia de los SP frente a escenarios asociados al cambio climático.

MODELO INTEGRADO DE VULNERABILIDAD MULTIAMENAZA EN CONSTRUCCIONES PECUARIA (MIVCP)

El modelo toma como base los enfoques contemporáneos de vulnerabilidad, en los cuales esta se interpreta como el resultado de la interacción entre la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa (Rodríguez, 2023). Sin embargo, el MIVCP amplía este planteamiento al incorporar de manera explícita el BA como una dimensión funcional del sistema, constituyendo así un aporte relevante para el análisis de los SP pecuarios. De igual manera, la propuesta mantiene coherencia con modelos actuales de evaluación

del riesgo que integran múltiples indicadores dentro de esquemas de análisis sistémico (El-Emam & Hamam, 2024).

Fundamento conceptual y transición hacia un modelo cuantificable.

El MIVCP parte de la siguiente hipótesis: “la vulnerabilidad en las construcciones pecuarias surge como una propiedad emergente producto de la interacción entre la infraestructura física, condiciones ambientales externas, respuesta biológica de los animales y capacidad adaptativa del sistema”. Desde esta perspectiva, el modelo no se limita únicamente a describir el riesgo, sino que también posibilita su medición mediante indicadores estructurados, favoreciendo tanto su aplicación práctica en campo como su posterior validación científica.

Estructura integrada del modelo

El modelo MIVCP está conformado por cuatro dimensiones interconectadas entre sí:

- 1. Vulnerabilidad estructural (E):** Hace referencia al nivel de susceptibilidad de la infraestructura ante condiciones adversas. Comprende variables relacionadas con materiales de construcción, diseño estructural, ventilación, altura y orientación de las instalaciones. Estos factores influyen directamente en la capacidad de la construcción para regular el microclima y reducir la acumulación de calor en el interior.
- 2. Exposición multiamenaza (S):** Corresponde a la presencia simultánea de diferentes amenazas, entre ellas el estrés térmico, la radiación solar, las sequías y las inundaciones. Esta dimensión reconoce que el riesgo en los sistemas agropecuarios posee un carácter sinérgico, donde múltiples factores ambientales pueden interactuar de manera concurrente (FAO, 2023).
- 3. Vulnerabilidad funcional (F)-BA:** Representa el componente innovador del modelo, ya que incorpora indicadores asociados al BA, tales como el índice temperatura-humedad (THI), comportamiento animal, respuestas fisiológicas, densidad animal y calidad del aire. Permitiendo valorar la funcionalidad biológica del sistema, considerando que una construcción puede presentar estabilidad estructural pero funcionalmente resulta inadecuada si afecta negativamente el BA.
- 4. Capacidad adaptativa (C):** Incluye aspectos relacionados con nivel de tecnificación, prácticas de manejo productivo, incorporación de tecnologías y acceso a información, actuando como un elemento mitigador de la vulnerabilidad, al fortalecer la capacidad de respuesta y adaptación del sistema frente a condiciones adversas (Rodríguez, 2023).

Expresión conceptual y operacional del modelo

El modelo se expresa como:

$$V=(E+S+F)-C$$

Donde cada dimensión puede ser evaluada mediante indicadores en escala estandarizada (0-5), permitiendo calcular un índice cuantitativo de vulnerabilidad. Esto implica que la vulnerabilidad aumenta cuando: la infraestructura es deficiente, la exposición ambiental es alta, el BA se ve comprometido y disminuye cuando existe mayor capacidad adaptativa.

Interpretación sistémica del modelo

El MIVCP permite interpretar la vulnerabilidad como el resultado de un sistema dinámico donde: la infraestructura influye sobre el microclima, las condiciones ambientales determinan la carga térmica, los animales generan respuestas fisiológicas frente a dichas condiciones y la gestión productiva condiciona la capacidad de resiliencia del sistema. Mejorando los enfoques lineales tradicionales y favoreciendo la integralidad evaluativa del riesgo en los SP.

Alcance y aplicabilidad

El modelo presenta aplicabilidad en: sistemas bovinos (leche y carne), producción porcina, avicultura, instalaciones equinas y sistemas mixtos. Asimismo, puede integrarse con: sistemas de información geográfica (SIG) y modelos climáticos e indicadores productivos; ofreciendo una herramienta adaptable para la evaluación del riesgo a múltiples escalas.

Aporte científico consolidado

El modelo MIVCP contribuye en tres niveles:

Tabla 3.
niveles del modelo

Nivel	Aporte
Conceptual	Integra dimensiones estructurales, ambientales y biológicas
Metodológico	Permite construir índices medibles de vulnerabilidad
Aplicado	Facilita la toma de decisiones en diseño y gestión productiva

Limitaciones y proyección

Aunque el modelo presenta un alto nivel de integración, su aplicación requiere: disponibilidad de datos medibles, definición estandarizada de indicadores y validación en campo.

No obstante, su estructura flexible permite adaptación a diferentes SP, constituyendo una base sólida para investigaciones y aplicaciones prácticas.

Operacionalización del modelo MIVCP

Se presenta a continuación la operacionalización final, pasando de lo conceptual a un

instrumento medible, comparable y replicable en campo.

Matriz de indicadores MIVCP

Cada dimensión del modelo se evalúa mediante indicadores cuantificables en escala de 0 a 5, donde valores altos representan mayor vulnerabilidad, excepto en la capacidad adaptativa, donde valores altos representan mayor resiliencia, tabla 4.

Tabla 4.
Estructura operativa de la matriz del modelo MIVCP.

Dimensión	Código	Indicador	Escala (0-5)	Criterio general
Vulnerabilidad estructural	E1	Material de cubierta	0-5	Aislante = bajo riesgo / metálico sin aislante = alto riesgo
	E2	Altura útil del techo	0-5	Mayor altura = menor vulnerabilidad
	E3	Ventilación cruzada	0-5	Alta = menor vulnerabilidad
	E4	Orientación solar	0-5	Óptima = menor radiación directa
	E5	Estado constructivo	0-5	Excelente = menor vulnerabilidad
Exposición multiamenaza	S1	Temperatura máxima media	0-5	Mayor temperatura = mayor exposición
	S2	Humedad relativa	0-5	Mayor humedad = mayor exposición
	S3	Radiación solar	0-5	Mayor radiación = mayor exposición
	S4	Frecuencia de olas de calor	0-5	Mayor frecuencia = mayor exposición
	S5	Riesgo hídrico (sequía/ inundación)	0-5	Mayor riesgo = mayor exposición
Vulnerabilidad funcional	F1	THI promedio	0-5	Mayor THI = mayor vulnerabilidad
	F2	Frecuencia respiratoria	0-5	Mayor rpm = mayor estrés
	F3	Caída productiva (%)	0-5	Mayor reducción = mayor vulnerabilidad
	F4	Conductas de evasión térmica	0-5	Mayor frecuencia = mayor vulnerabilidad
	F5	Calidad del aire	0-5	Deficiente = mayor vulnerabilidad
Capacidad adaptativa	C1	Sombra disponible	0-5	Mayor cobertura = mayor capacidad
	C2	Ventilación mecánica	0-5	Mayor soporte = mayor capacidad
	C3	Monitoreo ambiental	0-5	Automatizado = mayor capacidad
	C4	Manejo preventivo	0-5	Protocolizado = mayor capacidad
	C5	Capacitación técnica	0-5	Alta = mayor capacidad

Cálculo del índice compuesto

Se propone una versión ponderada del modelo, al reconocer la alta incidencia de la infraestructura y del BA en la vulnerabilidad total.

$$MIVCP=0.35E+0.30S+0.35F-0.25C$$

Donde:

E = promedio de E1–E5

S = promedio de S1–S5

F = promedio de F1–F5

C = promedio de C1–C5

Figura gráfica del modelo

Estructura operativa del Modelo Integrado de Vulnerabilidad Multiamenaza en Construcciones Pecuaria (MIVCP) ver figura 4.

Figura 4:
Arquitectura funcional del MIVCP

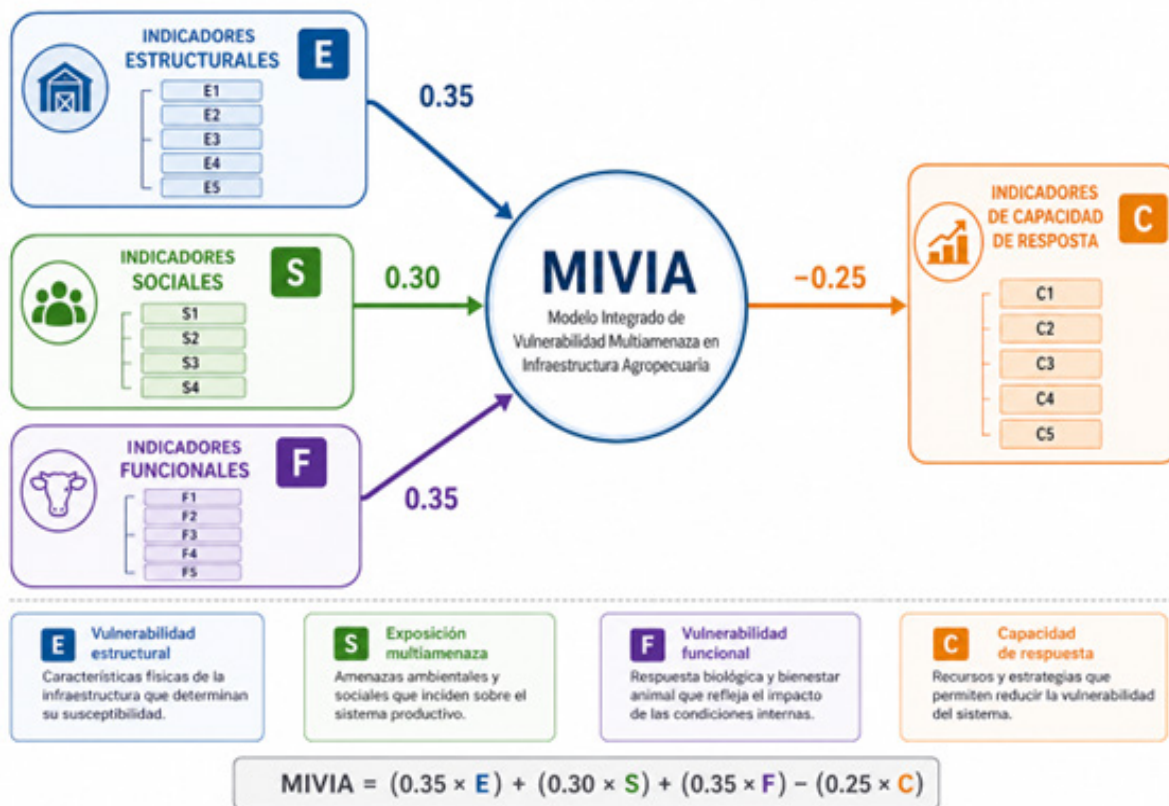


Figura 4. El esquema representa la arquitectura analítica del índice propuesto, en la cual la vulnerabilidad total se estima a partir de la interacción ponderada de tres bloques de riesgo positivo: indicadores estructurales (E), indicadores de exposición o contexto social-ambiental (S) e indicadores funcionales asociados al BA y desempeño productivo (F), con coeficientes de 0.35, 0.30 y 0.35, respectivamente. De manera compensatoria, el modelo

incorpora la capacidad de respuesta o adaptativa (C), con ponderación negativa (-0.25), reflejando su efecto reductor sobre la vulnerabilidad global. Cada dimensión se compone de cinco subindicadores (E1-E5, S1-S5, F1-F5 y C1-C5), lo que permite una evaluación multidimensional, cuantificable y comparable entre sistemas productivos. La estructura del modelo facilita su aplicación en diagnósticos de campo, priorización de intervenciones y diseño de estrategias de adaptación climática en infraestructura agropecuaria.

Vinculación del modelo con los resultados de la revisión

Los resultados obtenidos en la revisión sistemática proporcionan sustento teórico y empírico para cada una de las dimensiones que conforman el índice propuesto:

Dimensión estructural (E): La literatura analizada demuestra que variables como la ventilación, la altura de la cubierta, los materiales de construcción y la orientación de las instalaciones influyen de manera significativa sobre el microclima interno y la carga térmica experimentada por los animales (Cheng et al., 2024; Shin et al., 2022).

Dimensión de exposición (S): Los estudios revisados coinciden en señalar que la interacción entre altas temperaturas, elevada humedad relativa y radiación solar intensa constituye uno de los principales factores desencadenantes del estrés térmico en sistemas productivos ubicados en regiones tropicales (West, 2003; Herbut et al., 2018).

Dimensión funcional (F): Indicadores fisiológicos y productivos, como el índice temperatura-humedad (THI), la frecuencia respiratoria, la disminución en la producción de leche y las conductas evasivas, son ampliamente reconocidos en la literatura como biomarcadores asociados al estrés térmico animal (Cerqueira et al., 2016).

Dimensión adaptativa (C): La implementación de estrategias como ventilación mecánica, sistemas de sombreado artificial y monitoreo ambiental ha mostrado efectos positivos en la disminución de la vulnerabilidad global de los sistemas pecuarios (Arcidiacono, 2018).

6.8.5 Escala interpretativa del índice

Tabla 5:
Escala interpretativa del índice

Puntaje MIVCP	Interpretación
0.0 – 1.5	Baja vulnerabilidad
1.6 – 2.5	Vulnerabilidad moderada
2.6 – 3.5	Vulnerabilidad media-alta
3.6 – 5.0	Alta vulnerabilidad

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad en las construcciones pecuarias corresponde a un fenómeno

multidimensional donde interactúan factores estructurales, ambientales y biológicos. En este sentido, la infraestructura no solo cumple una función de protección física, sino que también desempeña un papel determinante en la regulación del microclima interno y en las condiciones de salud, comportamiento y productividad de los animales.

El diseño de las construcciones influye directamente sobre la resiliencia de los SP, estrategias relacionadas con ventilación adecuada, sombra, control ambiental y selección apropiada de materiales contribuyen al mejoramiento del BA y a la reducción de pérdidas productivas.

El Modelo Integrado de Vulnerabilidad Multiamenaza en Construcciones Pecuarias (MIVCP) representa un aporte relevante, integrando en una sola herramienta: análisis de vulnerabilidad estructural, exposición ambiental, funcionalidad biológica y capacidad adaptativa del sistema. Su implementación permitiría priorizar intervenciones, orientar inversiones y fortalecer procesos de planificación territorial rural.

La integración entre construcción pecuaria y BA es un elemento clave para la sostenibilidad y competitividad del sector pecuario, en un escenario donde la adaptación climática dejará de ser una alternativa y pasará a convertirse en una condición estratégica para la permanencia productiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Arcidiacono, C. (2018). Engineered solutions for animal heat stress abatement in livestock buildings. Department of Agriculture, Food and Environment (Di3A), University of Catania. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/4705>

Barrientos-Monsalve Ender José, Sotelo-Barrios Mauricio Enrique y Hoyos-Patiño Johann Fernando (2023). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. Guía práctica para la formulación de proyectos de investigación con ejemplos en áreas de administración y diseño. Primera edición. Ocaña, Norte de Santander: Universidad Francisco de Paula Santander; Bogotá: Ecoe Ediciones, 100 páginas. ISBN 978-958-503-827-1 (impreso) -- 978-958-503-828-8 (digital) <https://n9.cl/36lba>

Becker, C. A., Collier, R. J., & Stone, A. E. (2020). Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 103(6), 593–612. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>

Bedoya-Soto, J. M., Arias, P. A., & Vieira, S. C. (2024). Moisture recycling in the Colombian Andes. *Water Resources Research*, 60(3), e2022WR033601. <https://doi.org/10.1029/2022WR033601>

Bernabucci, U., Lacetera, N., Baumgard, L. H., Rhoads, R. P., Ronchi, B., & Nardone, A. (2010). Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal*, 4(7), 1167–1183. <https://doi.org/10.1017/S175173111000090X>

- Berragán-Hernández, W. A., Mahecha-Ledesma, L., & Cajas-Jirón, Y. S. (2015). Physiological-metabolic variables of heat stress in cows grazing in silvopastoral systems and in one treeless prairie. *Agronomía Mesoamericana*, 26(2), 211–223. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19277>
- Bjerg, B. (2023). Modelling and design of the microclimate in livestock housing. En *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24861-0_158
- Cartwright, S. L., Schmied, J., Livernois, A., & Mallard, B. A. (2022). Effect of in-vivo heat challenge on physiological parameters in dairy cattle. *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/2201.02675>
- Centurión, R. A. O., Tinôco, I. F. F., Gates, R. S., Ferreira, A. S., Zolnier, S., & Silva, J. N. (2014). Ambiente térmico y bienestar de los cerdos en el período de crecimiento y finalización. *Archivos de Zootecnia*, 63(241), 83–94. <https://doi.org/10.4321/S0004-05922014000200002>
- Cheng, Q., Wang, H., Xu, X., He, T., & Chen, Z. (2024). Indoor Thermal Comfort Sector: A Review of Detection and Control Methods for Thermal Environment in Livestock Buildings. *Sustainability*, 16(4), 1662. <https://doi.org/10.3390/su16041662>
- Cerqueira, J. O. L., Araújo, J. P. P., Blanco-Penedo, I., Cantalapiedra, J., Niza-Ribeiro, J., & Benavides, B. (2016). Predicción de estrés térmico en vacas lecheras mediante variables ambientales y fisiológicas. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5959624>
- Cook, N. B. (2021). Developments in housing of cattle to promote health and welfare. En *Understanding the behaviour and improving the welfare of dairy cattle* (1st ed.). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.1201/9781003180630-10>
- Correa-Calderón, Abelardo, Avendaño-Reyes, Leonel, López-Baca, M. Ángeles, & Macías-Cruz, Ulises. (2022). Estrés por calor en ganado lechero con énfasis en la producción de leche y los hábitos de consumo de alimento y agua. Revisión. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 13(2), 488-509. Epub 20 de junio de 2022. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5832>
- Costantino, A., Fabrizio, E., Ghiggini, A., & Bariani, M. (2021). The role of climate control in monogastric animal farming. *Applied Sciences*, 11(20), 9549. <https://doi.org/10.3390/app11209549>
- Das, R., Sailo, L., Verma, N., Bharti, P., Saikia, J., Intiwati, & Kumar, R. (2016). Impact of heat stress on health and performance of dairy animals: A review. *Veterinary world*, 9(3), 260–268. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2016.260-268>
- Das, S. K. (2018). Impact of climate change (heat stress) on livestock: Adaptation and

- mitigation strategies for sustainable production. *Agricultural Reviews*, 39(2), 130–136. <https://doi.org/10.18805/ag.R-1777>
- Djamila, H., Chu, C.-M., & Kumaresan, S. (2014). Effect of humidity on thermal comfort in the humid tropics. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 2(2), 109–117. <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2014.22010>
- El-Emam, D. A., & Hamam, E. (2024). Using the vulnerability index to assess the risk of climate change impacts on agricultural and food security. *Alfarama Journal of Basic & Applied Sciences*, 5(2), 293–308. <https://doi.org/10.21608/AJBAS.2024.258034.1206>
- Firfiris, V., Martzopoulou, A., & Kotsopoulos, T. (2019). Passive cooling systems in livestock buildings towards energy saving: A critical review. *Energy and Buildings*, 202, 109368. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109368>
- García-Ispierto, I., López-Gatius, F., Bech-Sabat, G., Santolaria, P., Yániz, J. L., Nogareda, C., De Rensis, F., & López-Béjar, M. (2007). Climate factors affecting conception rate of high producing dairy cows in northeastern Spain. *Theriogenology*, 67(8), 1379–1385. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2007.02.009>
- González-Rivas, P. A., Chauhan, S. S., Ha, M., Fegan, N., Dunshea, F. R., & Warner, R. D. (2020). Effect of heat stress on animal physiology, metabolism, and meat quality: A review. *Meat Science*, 162, 108025. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.108025>
- Goo, D., Kim, J. H., Park, G. H., Delos Reyes, J. B., & Kil, D. Y. (2019). Effect of Heat Stress and Stocking Density on Growth Performance, Breast Meat Quality, and Intestinal Barrier Function in Broiler Chickens. *Animals*, 9(3), 107. <https://doi.org/10.3390/ani9030107>
- Herbut, P., Angrecka, S., & Walczak, J. (2018). Environmental parameters to assessing of heat stress in dairy cattle-a review. *International journal of biometeorology*, 62(12), 2089–2097. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1629-9>
- Hoyos-Patiño, J. F., Casadiegos Santana, M. H., & Carrascal Vergel, A. M. (2022). Evolución normativa y jurisprudencial del bienestar animal en Colombia e implicaciones para los sistemas de producción pecuaria hasta 2022. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias - FAGROPEC*, 14(2), 124–136. <https://doi.org/10.47847/>
- Hoyos-Patiño, J. F. (2022). Indicadores de BA en bovinos. *Mundo FESC*, 12(23), 41-50. Recuperado a partir de <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/984>
- Hoyos-Patiño, Johann Fernando and Hernández-Villamizar, Daniel Antonio. (2022). **MANUAL DE RECOMENDACIONES PARA PROMOVER EL BIENESTAR ANIMAL**

EN CAPRINOS LECHEROS DEL TRÓPICO. EcoeEdiciones ISBN: ISBN 978-958-503-459-4 y e-ISBN: 978-958-503-460-0. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Johann-Hoyos-Patino/publication/366154899_MANUAL_DE_RECOMENDACIONES_PARA_PROMOVER_EL_BIENESTAR_ANIMAL_EN_CAPRINOS_LECHEROS_DEL_TROPICO/links/6393621a11e9f00cda30e708/MANUAL-DE-RECOMENDACIONES-PARA-PROMOVER-EL-BIENESTAR-ANIMAL-EN-CAPRINOS-LECHEROS-DEL-TROPICO.pdf

Johnson, J. S. (2018). Heat stress: Impact on livestock well-being and productivity and mitigation strategies to alleviate the negative effects. *Animal Production Science*, 58(8), 1404–1413. <https://doi.org/10.1071/AN17725>

Kiktev, N., Lendiel, T., Vasilenkov, V., Kapralyuk, O., Hutsol, T., Glowacki, S., Kuboń, M., & Kowalczyk, Z. (2021). Automated Microclimate Regulation in Agricultural Facilities Using the Air Curtain System. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 21(24), 8182. <https://doi.org/10.3390/s21248182>

Kochetova, O. V., Kostarev, S. N., Tatarnikova, N. A., & Sereda, T. G. (2021). Development of microclimate control system in cattle barns for cattle housing in the Perm region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 839(3), 032030. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/3/032030>

López-Quiñonez, Edna, Albarrán-Tamayo, Froylán I., Ramírez-Emiliano, Joel, Bañuelos-Hernández, Bernardo, & Cruz-Hernández, Andrés. (2021). Índice de Temperatura y Humedad (THI) respaldado por el cortisol capilar en ganado lechero para la medición de estrés calórico crónico. *Nova scientia*, 13(27), 00012. Epub 21 de febrero de 2022. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2811>

Mayorga, E. J., Renaudeau, D., Ramirez, B. C., Ross, J. W., & Baumgard, L. H. (2019). Heat stress adaptations in pigs. *Animal Frontiers*, 9(1), 54–61. <https://doi.org/10.1093/af/vfy035>

Mbuthia, J. M., Mayer, M., & Reinsch, N. (2021). Modeling heat stress effects on dairy cattle milk production in a tropical environment using test-day records and random regression models. *Animal*, 15(8), 100222. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100222>

Menéndez-Buxadera, A., Pereira, R. J., El Faro, L., & Santana Jr., M. L. (2020). Genotype by environment interaction due to heat stress during gestation and postpartum for milk production of Holstein cattle. *Animal*, 14(10), 2014–2022. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001068>

Molina-Benavides, Raúl Andrés, Perilla-Duque, Sandra, Campos-Gaona, Rómulo, Sánchez-Guerrero, Hugo, Rivera-Palacios, Juan Camilo, Muñoz-Borja, Luis Armando, & Jiménez-Rodas, Daniel. (2023). Efecto del clima sobre la respuesta térmica en vacas de diferentes grupos raciales en trópico bajo. *Revista MVZ Córdoba*, 28(3), 61-

71. Epub November 04, 2024. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2921>

Mondaca, M. (2019). Ventilation systems for adult dairy cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 35(1), 139–156. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2018.10.006>

Morgado, J. N., Lamonaca, E., Santeramo, F. G., Caroprese, M., Albenzio, M., & Ciliberti, M. G. (2023). Effects of management strategies on animal welfare and productivity under heat stress: A synthesis. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1145610. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1145610>

Mylostyyvi, R., Izhboldina, O., Chernenko, O., Khramkova, O., Kapshuk, N., & Hoffmann, G. (2020). Microclimate modeling in naturally ventilated dairy barns during the hot season: Checking the accuracy of forecasts. *Journal of Thermal Biology*, 93, 102720. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102720>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2023). Guía para la elaboración de análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en el sector agropecuario. https://cambioclimatico.fao.org/co/guia_vulnerabilidad/

Ortiz-Bobea, A., Ault, T., Carrillo, C. M., Chambers, R. G., & Lobell, D. B. (2021). Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. *Nature Climate Change*, 11, 306–312. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01000-1>

Ortiz Galvis, A. J., & Hoyos-Patiño, J. F. (2023). Evaluación del bienestar animal en sistemas porcinos intensivos y de cama profunda. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias - FAGROPEC*, 15(1), 48–65. <https://doi.org/10.47847/>

Park, R. M., Foster, M., & Daigle, C. L. (2020). A scoping review: The impact of housing systems and environmental features on beef cattle welfare. *Animals*, 10(4), 565. <https://doi.org/10.3390/ani10040565>

Parois, S. P., Cabezón, F. A., Gourdine, J. L., & Prunier, A. (2018). Effect of floor cooling on behavior and heart rate of sows under heat stress. *Frontiers in Veterinary Science*, 5, 223. <https://doi.org/10.3389/fvets.2018.00223>

Polsky, L., & von Keyserlingk, M. A. G. (2017). Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science*, 100(11), 8645–8657. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>

Reuscher, K. J., Cook, N. B., da Silva, T. E., Mondaca, M. R., Lutchterhand, K. M., & Van Os, J. M. (2023). Effect of different air speeds at cow resting height in freestalls on heat stress responses and resting behavior in lactating cows in Wisconsin. *Journal of Dairy Science*, 106(12), 9552–9567. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23364>

- Rodríguez Rubí, J. (2023). Análisis de vulnerabilidad agrícola al cambio climático para la región del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) (LC/MEX/TS.2023/38). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c05514e9-3c82-4fb7-a338-812b6f1603d1/content>
- Rodríguez-Lizcano, A. (2010). Elaboración de un mapa que muestre los grados de vulnerabilidad sísmica, para viviendas de uso residencial en la comuna 7 de la ciudad de Cúcuta. *Eco Matemático*, 1(1), 16–21. <https://doi.org/10.22463/17948231.218>
- Rodríguez-Lizcano, A., y Centeno-Lara, R. de la C. (2016). Aplicación de las TIC en el análisis y percepción del nivel de vulnerabilidad de construcciones residenciales de la ciudad de Cúcuta. *Revista Ingenio*, 11(1), 10–17. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2090>
- Romero-Hernández, C. M., Avila-Diaz, A., Quesada, B., Medeiros, F., Cerón, W. L., Guzman-Escalante, J., Ocampo-Marulanda, C., Rodrigues Torres, R., & Zuluaga, C. F. (2024). Bias-corrected high-resolution precipitation datasets assessment over a tropical mountainous region in Colombia: A case of study in Upper Cauca River Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 140, 104898. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104898>
- Romo-Valdez, J., Silva-Hidalgo, G., Murillo-García, J. C., Romo-Rubio, J., & otros. (2022). Estrés por calor: influencia sobre la fisiología, comportamiento productivo y reproductivo del cerdo. *Abanico Veterinario*, 12, 1–24. <https://doi.org/10.21929/abavet2022.37>
- Sae-tiao, T., Laodim, T., Koonawootrittriron, S., Suwanasopee, T., & Elzo, M. A. (2019). Tropical climate change and its effect on milk production of dairy cattle in Thailand. *Livestock Research for Rural Development*, 31(12). <https://lrrd.cipav.org.co/lrrd31/12/agrsk31194.html>
- Salama, A. A. K., Caja, G., Hamzaoui, S., Badaoui, B., Castro-Costa, A., Façanha, D. A. E., Guilhermino, M. M., & Bozzi, R. (2014). Different levels of response to heat stress in dairy goats. *Small Ruminant Research*, 121(1), 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2013.11.021>
- Schauberger, G., Hennig-Pauka, I., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S., Baumgartner, J., Niebuhr, K., Piringner, M., Knauder, W., Anders, I., Andre, K., & Niebuhr, M. (2020). Efficacy of adaptation measures to alleviate heat stress in confined livestock buildings in temperate climate zones. *Biosystems Engineering*, 200, 157–175. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.010>
- Schütz, K. E., Rogers, A. R., Cox, N. R., & Tucker, C. B. (2009). Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behaviour, and body temperature. *Applied Animal Behaviour Science*, 116(1), 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.apanbeh.2009.05.005>

org/10.1016/j.applanim.2008.07.005

Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J. B., Dunshea, F. R., & Lacetera, N. (2018). Adaptation of animals to heat stress. *Animal*, 12(S2), S431–S444. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001945>

Shin, H., Kwak, Y., Jo, S. K., Kim, S. H., & Huh, J. H. (2022). Applicability evaluation of a demand-controlled ventilation system in livestock. *Computers and electronics in agriculture*, 196, 106907. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106907>

Shin, H., Lee, S. Y., Kim, J. G., Park, D. H., Jo, S. K., & Kwak, Y. (2024). Applicability evaluation of a temperature humidity index-controlled ventilation system in livestock using a building energy simulation model. *Case Studies in Thermal Engineering*, 58, 104335. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104335>

Silanikove, N. (2000). Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livestock Production Science*, 67(1–2), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7)

Song, J., Yu, Q., Wang, X., Wang, Y., Zhang, Y., & Sun, Y. (2023). Relationship between microclimate and cow behavior and milk yield under low-temperature and high-humidity conditions. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1058147. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1058147>

Sugiono, S., Hardiningtyas, D., & Soenoko, R. (2016). Measuring thermal stress of dairy cattle based on temperature humidity index (THI) in tropical climate. *MATEC Web of Conferences*, 68, 06004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20166806004>

Thammahakin, P., Yawongsa, A., & Rukkwamsuk, T. (2020). Effect of heat stress on reproductive performance of dairy cows under tropical climate: a review. <https://www.researchgate.net/publication/354559735>

Țogoe, D., Popescu, S., & Borda, C. (2024). Physiological and productive responses of livestock under heat stress conditions. *Agriculture*, 14(8), 1241. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081241>

Toledo, I. M., et al. (2022). Dairy cattle management and housing for warm environments. *Livestock Science*. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104802>

Tucker, C. B., Rogers, A. R., & Schütz, K. E. (2008). Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Applied Animal Behaviour Science*, 109(2-4), 141-154. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2007.03.015>

- VanderZaag, A. C., et al. (2023). Comparing thermal conditions inside and outside lactating dairy barns. *Journal of Dairy Science*, 106(9). [https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302\(23\)00274-6/fulltext](https://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302(23)00274-6/fulltext)
- Vega, A. R., García, A., Guillen, A., Ruiz, Y., & Armenteros, M. (2014). Índice de temperatura humedad y el estrés calórico en el ganado bovino de leche en Guáimaro, Cuba. *Revista de Producción Animal*, 26(2), 44–52. <https://www.redalyc.org/pdf/7019/701978398003.pdf>
- Vieira Junior, N. A., Silva, M. A. A., Caramori, P. H., Nitsche, P. R., Corrêa, K. A. B., & Alves, D. S. (2019). Temperature, thermal comfort, and animal ingestion behavior in a silvopastoral system. *Semina: Ciências Agrárias*, 40(1), 403–416. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2019v40n1p403>
- West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- Witkowska, D., Korczyński, M., Koziel, J. A., Sowińska, J., & Chojnowski, B. (2020). The effect of dairy cattle housing systems on gaseous emissions and indoor air quality. *Annals of Animal Science*, 20(4), 1487–1507. <https://doi.org/10.2478/aoas-2020-0039>
- Wu, Z., Heiselberg, P., & Stoustrup, J. (2005). Modeling and control of livestock ventilation systems and indoor environments. En *Proceedings of the 26th Air Infiltration and Ventilation Center (AIVC) Conference: Ventilation in relation to the energy performance of buildings* (pp. 335–340). <https://vbn.aau.dk/en/publications/modeling-and-control-of-livestock-ventilation-systems-and-indoor->