

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Factores de emisiones de gases del sector porcícola en el departamento de Antioquia

Natalia Castrillón Mejía

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2020

Factores de emisiones de gases del sector porcícola en el departamento de Antioquia

Natalia Castrillón Mejía

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de: **Magister en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible**

Director (a):

Verónica González Cadavid, Zoot. M.Sc. Ph.D. Departamento de producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Codirector (a):

Jairo Alexander Osorio Saraz, Ing Agrícola. M.Sc. Ph.D. Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Línea de Investigación:

Grupo de Investigación: Biodiversidad y Genética Molecular (BIOGEM), Departamento de Producción Animal.

Grupo de Investigación: Ingeniería Agrícola – Línea de investigación: Bioclimática aplicada a la Agroindustria

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2020

Dedicado a:

Mi compañero de vida

Agradecimientos

A los profesores Verónica González Cadavid y Jairo Alexander Osorio Saraz, por su conocimiento y entrega para ser guía en este camino de investigar y aprender para compartir.

A las compañeras del laboratorio de bioclimática Ana Paola Montoya y Yesica Paola Quintero, quienes estuvieron siempre dispuestas a enseñarme y acompañarme en el proceso.

A Sergio Zapata por su apoyo incondicional con la logística para el desarrollo en campo y por todas las atenciones recibidas en las granjas.

A Luis Fernando hincapié por brindar todo su conocimiento y experticia en el diseño de presupuestos y construcción de granjas

Al doctor Luis Alberto Gonzales Santamaria por su apoyo al compartir su conocimiento y el gran aporte en las propuestas de gestión de los impactos ambientales del sector porcícola.

Por último, a mi compañero de vida Santiago Ramírez que siempre me acompañó y aprendió conmigo de la frustración, la disciplina, los fracasos, los sueños y los éxitos.

Resumen

El crecimiento explosivo de las explotaciones confinadas de cerdos en todo el mundo ha generado preocupación en muchos investigadores sobre el impacto ambiental, la salud, la productividad ganadera y la generación de biogases asociados a este tipo de producción a gran escala. El objetivo de este trabajo fue estudiar la concentración y las emisiones de gas metano de diez tipologías constructivas diferentes en función de las variables climáticas, constructivas y de confort térmico. Para lograr el objetivo se plantearon las características constructivas más relevantes para mejorar el confort térmico de los animales, disminuir las emisiones de gases, y proponer las tipologías por grupo etareo en función del piso térmico y características constructivas que mejor se adaptan a las condiciones de producción animal. Adicionalmente se visitaron 10 granjas de etapa de ceba ubicadas en el departamento de Antioquia - Colombia, entre 800-2300 metros sobre el nivel del mar, únicamente fue posible encontrar tipologías que trabajaban con ventilación natural. En los alojamientos de los animales se realizaron mediciones climáticas con sensores manuales con cuyos resultados se calcularon los índices de humedad y temperatura de globo negro (BGHI) y el Índice de Humedad y Temperatura (THI) para cada una de las instalaciones, encontrando resultados entre los rangos 78 ± 5 - 68 ± 2 ; y 79 ± 4 - 69 ± 3 respectivamente. Las medidas de metano se tomaron con sensores ubicados en puntos intermedios de las áreas de entrada y salida de ventilación y se analizó el comportamiento de la concentración y emisión de metano de las instalaciones junto con la correlación y evolución temporal de las variables climáticas, índices de confort y tipologías constructivas. La información se analizó mediante estadística descriptiva, análisis de varianza (ANOVA) y análisis de componentes principales (PCA). Se encontraron resultados como: un promedio de tasa de Emisión de CH_4 (ER) por instalación (Kg año^{-1}) de 607.9, Potencial de Calentamiento Global (GWP) por instalación (Kg año^{-1}) de 15197.42 y correlaciones significativas entre RE, frecuencia de limpieza (CF), unidad animal (AU), flujo de aire (Q), densidad animal (DA) y humedad relativa (HR). Esta es la primera investigación con este alcance reportada en Colombia, la cual será importante para futuras investigaciones y políticas gubernamentales.

X

Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones de engorde de cerdos en el departamento de Antioquia - Colombia

Palabras clave: índice de confort animal, estrés térmico, bienestar animal, emisiones de metano, gases de efecto invernadero, ventilación natural, porcicultura.

Abstract

Gas emission factors of swine production in the department of Antioquia

The explosive growth of pig production at high densities in confined farms around the world has raised concerns among many researchers about the environmental impact, health and productivity of livestock and the production of biogases associated with this type of large-scale production. The objective of this work was to study the concentration and emissions of methane gas from ten different construction typologies based on climatic, constructive and animal welfare variables. To achieve the objective, the most relevant constructive characteristics were proposed that allow improving the thermal comfort conditions of the animals, reducing gas emissions; and propose the typologies by age group according to the thermal floor and construction characteristics that best adapt to the conditions of animal production. Additionally, 10 fattening stage farms were visited located in the department of Antioquia - Colombia, between 800-2300 meters above sea level, it was only possible to find typologies that worked with natural ventilation, Measurements to climatic variables were carried out in the housing of the animals with manual sensors, with the results the humidity and temperature indices of the black globe (BGHI) and the Humidity and Temperature Index (THI) were calculated for each of the facilities, finding results between the ranges 78 ± 5 - 68 ± 2 and 79 ± 4 - 69 ± 3 respectively. Methane measurements were taken with sensors located at intermediate points of the ventilation inlet and outlet areas and the behavior of the concentration and emission of methane from the facilities was analyzed together with the correlation and temporal evolution of the climatic variables, indices of comfort and construction typologies. The information was analyzed using descriptive statistics, analysis of variance (ANOVA) and principal component analysis (PCA). Results were found such as an average CH₄ Emission rate (ER) per facility (Kg year⁻¹) of 607.9, Global Warming Potential (GWP) per facility (Kg year⁻¹) of 15197.42 and significant correlations between RE, cleaning frequency (CF), animal unit (AU), air flow (Q), animal density (DA) and relative humidity (RH). This is the first investigation reported in Colombia, which will be important for future investigations and government policies.

Keywords: animal comfort index, thermal stress, animal welfare, methane emissions, greenhouse gases, natural ventilation, pig farming.

Contenido

	Pág.
1. Capítulo 1	7
1.1 Introducción	8
1.2 Materiales y métodos	13
1.2.1 Recopilación de la información	13
1.2.2 Análisis.....	17
1.2.3 Determinación de las tipologías constructivas de mayor viabilidad	19
1.3 Resultados y discusión	20
1.3.1 Principales conceptos para determinar el nivel de tecnificación de una granja 20	
1.3.2 propuesta de clasificación de tamaño de granja por grupo etareo	21
1.3.3 Determinación de las tipologías constructivas.....	22
1.4 Conclusiones.....	33
1.5 Referencias	34
2. Capítulo 2	43
2.1 Introducción	44
2.2 materiales y métodos	46
2.2.1 Localización y caracterización del área de estudio	46
2.2.2 Características de los animales evaluados	48
2.2.3 Equipos utilizados.....	48
2.2.4 Desarrollo experimental	50
2.2.5 Índices de confort térmico	51
2.2.6 Análisis estadístico	52
2.3 Resultados y discusión	53
2.4 CONCLUSIONES.....	59
2.5 REFERENCIAS.....	59
3. Capítulo 3	63
3.1 INTRODUCCIÓN	65
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	68
3.2.1 Descripción del clima:.....	69
3.2.2 Gestión técnica de las fincas:.....	69
3.2.3 Características de las Instalaciones.....	69
3.2.4 Plazo de las mediciones.....	71
3.2.5 Características del equipo utilizado	72
3.2.6 Ubicación de los dispositivos colectores y frecuencia de medición	73
3.2.7 Determinación de factores de emisión y otras variables.	73
3.2.8 Diseño estadístico	75
3.3 RESULTS AND DISCUSSION	75
3.4 CONCLUSIONES.....	80
3.5 REFERENCIAS.....	81

4. Conclusiones y recomendaciones	86
4.1 Conclusiones.....	86
4.2 Recomendaciones	86

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Estructura de todas las posibles combinaciones	23
Figura 1-2 Análisis de sensibilidad de decisión de las diferentes alternativas.....	24
Figura 1-3 Material de piso por grupo etareo.....	26
Figura 1-4 Tipos de estructuras de evacuación de excretas por grupo etareo.....	26
Figura 1-5 Diseño de cubierta del techo	27
Figura 1-6 Estructura lateral	27
Figura 2-1 Distribución de puntos de toma de muestras en las instalaciones.....	50
Figura 2-2 Índices de confort térmico por tipología.....	55
Figura 3-1 Esquema de la configuración de las variables medidas: sensores independientes. Variables medidas: Temperatura (T), humedad relativa (RH), Velocidad del aire (V) y Presión atmosférica (P) y Metano (CH ₄).	72
Figura 3-2 Análisis de componentes principal (PCA)	80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Pisos térmicos Clasificación de CALDAS-LANG.....	11
Tabla 1-2 Localización de las granjas en Antioquia de acuerdo al piso térmico.....	17
Tabla 1-3 Características a evaluar	18
Tabla 1-4 Escala de importancia relativa (1-9) de AHP (Ameen & Mourshed, 2019).....	18
Tabla 1-5 Factores Técnicos de una granja tecnificada	20
Tabla 1-6 Clasificación de granjas de acuerdo al número de animales	21
Tabla 1-7 Variables para clasificación de tipologías constructivas	23
Tabla 1-8 Posibles combinaciones por tipología constructiva	28
Tabla 1-9 Matriz de comparación normalizada	29
Tabla 1-10 Resultados de jerarquización de las alternativas	29
Tabla 1-11 Propuesta de tipologías constructivas de acuerdo al grupo etareo y piso térmico.....	31
Tabla 2-1 Descripción de las diferentes tipologías constructivas. (Castrillón et al., 2020)	46
Tabla 2-2 Equipos utilizados.	49
Tabla 2-3 Clasificación de pisos térmicos y distribución de las granjas del departamento de Antioquia	51
Tabla 2-4 Límites de confort térmico para cerdos (de Oliveira Júnior et al., 2018)	52
Tabla 2-5 Zona de termo-neutralidad porcina en las diferentes etapas de producción. (Rodrigues et al., 2010)	52
Tabla 2-6 ANOVA de Temperatura, Humedad Relativa, Índices THI y BGHI para diferentes tipologías constructivas.	54
Tabla 2-7 Análisis de varianza de las variables temperatura, humedad relativa e índices THI y BGHI para diferentes pisos térmicos.....	56
Tabla 2-8 Mapa de isotermas para los índices THI y BGHI, en las diferentes tipologías constructivas.	56
Tabla 3-1 Características de cada tipología.....	69
Tabla 3-2 Clasificación de tipología según clasificación climática	71
Tabla 3-3 Referencia, rango y precisión de sensores de bajo costo (LC).	72
Tabla 3-4 Valores promedio, intervalos de confianza y desviación estándar de cada variable.....	76
Tabla 3-5 CH ₄ ER por tipología constructiva.....	77
Tabla 3-6 ER por animal, unidad animal (AU) y GWP AU	77
Tabla 3-7 Anova Concentración de CH ₄ (ppm) e índices de confort térmico para cada tipología.....	79
Tabla 3-8 Variables con correlación significativa con ER.....	80

Introducción

La carne de cerdo es la segunda carne más consumida en el mundo, representando el 43% de la producción mundial de carne para el consumo humano (OCDE/FAO, 2018), la distribución a nivel mundial se concentra principalmente en Asia 59%, Europa 22% y América del Norte y Central con el 11%. China, la unión europea y Estados Unidos producen más del 86% del ganado porcino (USDA, 2011); en América la mayor producción se da en países como Estados Unidos, Canadá, Brasil y México. Colombia solo produce el 1% de la carne en el continente americano (Porkcolombia & PigCHAMP, 2015), con cerca de 14.000 granjas porcícolas, de las cuales el 27% se consideran granjas tecnificadas. Este crecimiento ha despertado un profundo interés a nivel mundial en temas de bienestar animal y evaluación de impacto ambiental, ambos ampliamente estudiados para sistemas de producción de cerdos, con la finalidad de encontrar mejores prácticas de gestión a nivel comercial (Rhodes et al., 2005).

La evaluación del bienestar animal comprende mediciones de respuestas fisiológicas, salud, comportamiento, y productividad (Rhodes et al., 2005). La producción porcina se realiza generalmente en sistemas intensivos, donde los animales experimentan estrés agudo durante procedimientos de gestión estándar como castración, atraque de cola, destete abrupto, reagrupación, transporte y confinamiento (Reimert et al., 2014), lo que convierte en todo un reto brindar condiciones que ayuden a mitigar este impacto en su bienestar. Adicionalmente, los diferentes componentes de la cadena de suministro de carne de cerdo pueden tener percepciones divergentes con respecto al bienestar animal (Pietrosemoli & Tang, 2020), los consumidores quieren naturalidad, lo que permita a los cerdos realizar sus comportamientos específicos de especie, mientras que la orientación de los veterinarios, científicos y otros profesionales del cuidado de los animales hacia el bienestar animal presta más atención a la salud física, el rendimiento animal y la eficiencia de la producción (Pietrosemoli & Tang, 2020). Para lograr el bienestar de los animales los alojamientos son determinantes y deben buscar siempre: 1) minimiza la agresión y la competencia; 2) proteger a los animales de los efectos perjudiciales asociados con extremos ambientales, particularmente temperaturas extremas; 3) reducir la exposición a los peligros que resultan en lesiones, dolor o enfermedad; 4) proporcionar a cada animal acceso diario a cantidades y tipos apropiados de alimentos y agua; 5) facilitar la

observación de apetito individual de los animales, frecuencia respiratoria, micción y defecación; 6) estado reproductivo; y 7) permitir que expresen los patrones más normales de comportamiento (D. Cecchin et al., 2019) .

En cuanto a impactos ambientales del sistema productivo se han estudiado ampliamente aquellos asociados a la gestión del estiércol evaluando principalmente contaminación de suelos, agua y generación de emisiones atmosféricas, estas últimas en relación a la toxicidad en el entorno y aporte de gases con potencial de calentamiento global GWP (por sus siglas en inglés) (Castrillón et al., 2020). De acuerdo a de Vries & de Boer, (2010) Los animales monogástricos tienen un mayor potencial de calentamiento global (GWP) generalmente determinado por N₂O (óxido nitroso) y CH₄ (metano) emisiones debidas a la gestión del estiércol, ambos gases son contribuyentes importantes debido a que su GWP en el lapso de un siglo es 310 y 25 veces más alto que CO₂ (dióxido de carbono), respectivamente (Salomon et al., 2007). Los experimentos realizados con cerdos de destete y engorde demostraron que las emisiones de CO₂ pueden diferir en función de la tipología constructiva, mientras que características como la dieta, la eficiencia animal y las condiciones climáticas permanecieron iguales (François Xavier Philippe et al., 2011). Para Monteny et al., (2006) en animales monogástricos, como los cerdos, el CH₄ se produce mayoritariamente en el intestino grueso y el almacenamiento en tanque estercolero, sin embargo, el estiércol almacenado en fosas inundada y pisos de corrales también son fuentes relevantes bajo las siguientes condiciones: 1) La temperatura y la tasa de ventilación aumentan el trabajo de bacterias metanogénicas que transforman acetato, CO₂ y H₂ en metano en un ambiente termofílico, 2) Tiempo de almacenamiento, 3) pH óptimo cercano a neutro (François Xavier et al., 2011), 4) altos niveles de materia orgánica degradable, y 5) altos niveles de humedad que facilitan la metanogénesis tanto en la fase líquida como sólida del estiércol.

Actualmente existen regulaciones para gases tóxicos como el amoníaco, sin embargo, no fue posible encontrar evidencia de una regulación que pueda limitar las emisiones de GEI de los alojamientos de los animales. Además, la legislación existente se limita a solicitar informes, como es el caso de la Unión Europea, donde se solicita a los productores que reporten emisiones anuales de CH₄ superiores a 100.000 kg e Israel cuando superen los 10.000 kg al año. (Bjerg, Demeyer, et al., 2019). Hay pocos estudios en todo el mundo para medir las concentraciones de CH₄ en la población porcina en climas tropicales, en los

que el alojamiento de los animales funciona con ventilación natural todo el año. En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo estudiar las concentraciones y emisiones de CH₄ en las instalaciones de engorde de cerdos, donde es difícil separar las emisiones de GEI provenientes directamente de los animales de las generadas por el estiércol. Como resultado, las emisiones de los animales y su alojamiento se agrupan en una categoría: Emisiones del alojamiento (emisiones totales de ganado y estiércol dentro de las instalaciones) (Sedorovich et al., 2007). Este trabajo es uno de los primeros en realizar este enfoque en el país.

1. Capítulo 1

Artículo presentado en la revista *Agronomy Research*, 12/2020

Aproximación a la clasificación de tipologías constructivas de instalaciones porcinas: caso de estudio Antioquia – Colombia

N. Castrillón^{2,3*}, V. González^{1,3}, J.A. Osorio¹

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Carrera 65 #59A-110, Código postal CO050034 Medellín, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, AV 80 #65-223, Código postal CO050034 Medellín, Colombia

³Grupo de Investigación en Biodiversidad y Genética Molecular (BIOGEM), Departamento de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Carrera 65 No. 59 A-110, CO050034 Código, Colombia

*Correspondence: ncastrillon@unal.edu.co

Resumen

Las instalaciones porcícolas para producción confinada en países tropicales como Colombia, no especifican en la actualidad una clasificación tipológica determinada que permita a los investigadores realizar evaluaciones en trabajos relacionados con

determinación del confort animal e impactos al medio ambiente en función del tipo de alojamientos. El objetivo de este trabajo fue identificar las características constructivas más impactantes que permitan mejorar las condiciones de confort térmico de los animales, disminuir la generación de gases; y proponer las tipologías más características por grupo etareo en función del piso térmico y características constructivas que mejor se adapten a las condiciones de producción animal, teniendo como base las tipologías usadas en el Departamento de Antioquia – Colombia, como principal productor de cerdos en el país. Para lograr el objetivo se trabajó en conjunto con un panel de expertos y se aplicaron metodologías de encuestas; análisis de sensibilidad de decisiones; y el método analítico jerárquico AHP. Se obtuvieron parámetros que permiten describir el concepto de granja tecnificada dentro de los cuales los más relevantes son: medidas de bioseguridad, medición de parámetros zootécnicos, desarrollo de capacitaciones al personal y cumplimiento legal. Adicionalmente se definieron rangos para establecer el tamaño de granja de acuerdo al número de animales por grupo etareo: 1) Cría pequeña (50 – 200), mediana (201 – 1000) y grande (1001 – 5000); 2) Precebo pequeña (60– 200), mediana (201 – 800) y grande (801 – 5000); y 3) Levante – ceba pequeña (50 – 500), mediana (501 – 1000) y grande (2001 – 5000). Se determinaron en total 4320 combinaciones tipológicas de las cuales se encontraron viables 948 y se determinaron las de mayor viabilidad técnica por grupo etareo: gestación 30; cría 24; precebo 19; y levante y ceba 70. Por último, se priorizaron las características constructivas de mayor viabilidad técnica para cada grupo etareo y piso térmico y se propusieron 36 tipologías. Se evidenció que los alojamientos para cría y precebo son los que presentan mayor protección de los efectos del clima exterior, y las estructuras de ventilación lateral son las más sensibles a variaciones del piso térmico.

Palabras clave: Tipologías constructivas, porcicultura en climas tropicales, confort animal, bioclimática.

1.1 Introducción

La carne de cerdo es la segunda carne más consumida en el mundo, representando el 43% de la producción mundial de carne para el consumo humano (OCDE/FAO, 2013), la distribución a nivel mundial se concentra principalmente en Asia 59%, Europa 22% y

América del Norte y Central con el 11% y China, la unión europea y Estados Unidos producen más del 86% del ganado porcino (USDA, 2011); en América la mayor producción se da en países como Estados Unidos, Canadá, Brasil y México. Colombia solo produce el 1% de la carne en el continente americano (Porkcolombia & PigCHAMP, 2015), con cerca de 14.000 granjas porcícolas, de las cuales el 27% se consideran granjas tecnificadas. Este crecimiento ha despertado un profundo interés a nivel mundial en temas de bienestar animal y evaluación de impacto ambiental, ambos ampliamente estudiados para sistemas de producción de cerdos, con la finalidad de encontrar mejores prácticas de gestión a nivel comercial (Rhodes et al., 2005).

La evaluación del bienestar animal comprende mediciones de respuestas fisiológicas, salud, comportamiento, y productividad (Rhodes et al., 2005). La producción porcina se realiza generalmente en sistemas intensivos, donde los animales experimentan estrés agudo durante procedimientos de gestión estándar como castración, atraque de cola, destete abrupto, reagrupación, transporte y confinamiento (Reimert et al., 2014), lo que convierte en todo un reto brindar condiciones que ayuden a mitigar este impacto en su bienestar. Adicionalmente, los diferentes componentes de la cadena de suministro de carne de cerdo pueden tener percepciones divergentes con respecto al bienestar animal (Pietrosemoli & Tang, 2020), los consumidores quieren naturalidad, lo que permita a los cerdos realizar sus comportamientos específicos de especie, mientras que la orientación de los veterinarios, científicos y otros profesionales del cuidado de los animales hacia el bienestar animal presta más atención a la salud física, el rendimiento animal y la eficiencia de la producción (Pietrosemoli & Tang, 2020). Como consenso entre las partes se cuenta con el concepto de las denominadas “Cinco Libertades”, definidas por el Consejo de Bienestar de los Animales de Granja Británicos (FAWC: Farm Animal Welfare Council), que la Unión Europea considera como la base para el bienestar animal, para este concepto básico los animales merecen: 1) estar libres de incomodidades; 2) estar libres de sed, hambre y malnutrición; 3) estar libres de sufrimiento, miedo y angustia; 4) estar libres de dolor, heridas y enfermedades y 5) poder expresar su comportamiento normal (Pietrosemoli & Tang, 2020).

De acuerdo con lo anterior los alojamientos son determinantes y deben buscar siempre: 1) minimiza la agresión y la competencia; 2) proteger a los animales de los efectos perjudiciales asociados con extremos ambientales, particularmente temperaturas

extremas; 3) reducir la exposición a los peligros que resultan en lesiones, dolor o enfermedad; 4) proporcionar a cada animal acceso diario a cantidades y tipos apropiados de alimentos y agua; 5) facilitar la observación de apetito individual de los animales, frecuencia respiratoria, micción y defecación; 6) estado reproductivo; y 7) permitir que expresen los patrones más normales de comportamiento (D. Cecchin et al., 2019) .

Para (CIGR, 2006) referente a una revisión multidisciplinaria sobre las diferencias en características constructivas de mayor relevancia para el confort animal entre zonas con estaciones muy marcadas y subtropicales o tropicales, se encontró que en la primera, la mayoría de los animales se mantienen en edificios cerrados, con ventilación mecánica / natural y normalmente aislada, donde se trabaja con sistemas de control climático para mantener la temperatura interior y la humedad relativa pero en los calurosos días de verano, los problemas de aclimatación con temperaturas excesivas son idéntico a los problemas en zonas subtropicales. En las zonas tropicales y subtropicales, muchos edificios de animales tienen lados abiertos y no están aislados garantizando una ventilación natural que representa menores costos operativos y emisiones de gases de efecto invernadero (Reckmann et al., 2013). En estos países tropicales y subtropicales la principal causa de un desconfort térmico es la cantidad de calor producida por la absorción de energía solar que logran las instalaciones de los animales ya que la mayoría de estas están dotadas de ventilación natural y sistemas abiertos, y en pocos casos sistemas híbridos, por tal motivo, este debería ser el primer atributo a tener en cuenta en un diseño bioclimático (Pietrosemoli & Tang, 2020). Además, deben facilitar el trabajo de profesionales en granja, asumiendo el mínimo riesgo, siendo ergonómicas para los trabajadores aportando a una mayor rentabilidad económica, minimizando gastos de mantenimiento (consumo de energía y agua, vías de acceso, reparaciones, etc) y cumplimiento de los parámetros impuestos por la legislación nacional y regional.

En cuanto a impactos ambientales se han estudiado ampliamente aquellos asociados a la gestión del estiércol evaluando principalmente contaminación de suelos, agua y generación de emisiones atmosféricas estas últimas en relación a la toxicidad en el entorno y aporte de gases con potencial de calentamiento global GWP (por sus siglas en inglés) (Castrillón et al., 2020). También existen otros impactos un poco más relacionados con los

alojamientos de los como son los consumos de los recursos naturales como el agua, la energía y las materias primas (Reckmann et al., 2013). Las actividades más relevantes para el medio ambiente en esta fase de producción son el manejo del agua; la alimentación; consumos de energía; gestión del estiércol líquido y sólido; la gestión de otros residuos; y el diseño de los alojamientos y características de confort térmico (Reckmann et al., 2013).

Las principales características a tener en cuenta en la planificación de un alojamiento enmarcadas en fundamentos técnicos para brindar bienestar animal y propender por la reducción de impactos ambientales son:

- 1) la localización por grupo etario (reposición, gestación, cría, precebo y cebo) donde se debe buscar minimizar y facilitar su trasiego dentro y entre naves (Huerta_Crispin & Gas, 2012).
- 2) Topografía del terreno: lo ideal es ubicar las naves o corrales en zonas elevadas, con la finalidad de mejorar la bioseguridad y evitar la propagación de gases y olores a zonas pobladas y facilitar el manejo de los subproductos líquidos para reducir el consumo de energía (Reckmann et al., 2013).
- 3) Temperatura ambiental y piso térmico: según la clasificación de Caldas lang los “pisos térmicos”, en los países localizados en la franja tropical son los que se presentan en la tabla 1.1.

Tabla 1-1 Pisos térmicos Clasificación de CALDAS-LANG

Piso térmico	Rango de elevación	Rango de temperaturas
Cálido	0 - 900	$T \geq 24^{\circ}\text{C}$
Templado	901 - 1900	$24^{\circ}\text{C} > T > 18^{\circ}\text{C}$
Frio	1901 - 2800	$18^{\circ}\text{C} > T > 12^{\circ}\text{C}$
Muy frio	2801 - 3700	$12^{\circ}\text{C} > T > 6^{\circ}\text{C}$
Extremadamente frio	3701 - 4700	$6^{\circ}\text{C} > T > 0^{\circ}\text{C}$
Nival	> 4700	$T < 0^{\circ}\text{C}$

Fuente: (Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2005) (Gobernación de Antioquia, 2014)

- 4) Características Constructivas: el área útil para los animales, que, junto al tipo de suelo, el tamaño de los grupos y a la distribución del utillaje, ha de constituir la base para el control

físico y social de los animales (Machado et al., 2016b). Las características propias del edificio que han de permitir el control climático del espacio interior, garantizando principalmente la circulación del aire, remoción de la humedad y disipación del calor. El ambiente interior de las naves de producción animal es el resultado de los siguientes parámetros: i) Orientación de las instalaciones, ii) Temperatura, (Sousa et al., 2018); iii) los posibles sistemas de refrigeración y/o calefacción este último muy utilizado en animales jóvenes (Jackson et al., 2018) iv) tasa de ventilación y distribución del aire (D Cecchin et al., 2017); v) Producción de calor y humedad de los animales; vi) Radiación solar en horario diurno; vii) Temperatura del ambiente exterior (D. Cecchin et al., 2019); viii) Humedad relativa exterior e interior la cual para ser óptima debe encontrarse entre los 50 y 70%; ix) velocidad del aire interior y exterior; x) Buen aislamiento de tuberías para asegurar la distribución de agua dulce (CIGR, 2006); xi) Distancia de obstáculos: idealmente se deberá garantizar una distancia de un obstáculo u otro galpón; xii) Emisión de Gases: en instalaciones pecuarias se debe garantizar la disminución de gases como amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de Carbono (CO), ácido sulfhídrico (SH_2), Metano (CH_4) y material particulado entre otros (D Cecchin et al., 2017)

5) El manejo de los residuos o subproductos: en este aspecto el piso de la nave cumple un papel fundamental y son posibles los siguientes tipos, a) Piso liso en concreto; b) pisos ranurados sobre piso lavable; c) pisos ranurados sobre fosa inundable y d) cama profunda. En función del tipo de piso, las deyecciones se manejarán en forma sólida o líquida (Seibert & Norwood, 2011) (Broucek, 2018).

6) tipo de proceso productivo implementado, existen 3 tipos de establecimientos a) Establecimiento de cría su finalidad es producir lechones entre los 20 y 25 kg de peso y 63 días de vida aproximadamente; b) Precebo o crianza de los lechones destetos y c) Establecimiento levante y ceba.

En países donde las temperaturas son extremas como en Reino Unido y Australia se suelen utilizar sistemas de calefacción y refrigeración, los sistemas se encuentran con definiciones detalladas y clasificaciones tipológicas definidas (Jackson et al., 2018) permitiendo realizar comparaciones de la eficiencia entre ellas, por el contrario en países tropicales como Colombia la producción confinada de cerdos, no cuenta con una

clasificación determinada en cuanto a su tipología constructiva, tamaño de granja, ni existe una definición específica que permita establecer que es una granja tecnificada. La resolución 2640 del 2007 del Instituto Colombiano Agropecuario - ICA ente que regula la producción agropecuaria donde reglamenta las condiciones sanitarias y de inocuidad en la producción primaria del ganado porcino destinado a sacrificio para el consumo humano, es la única herramienta a nivel nacional que da criterios para evaluar las instalaciones productivas. La necesidad de establecer o clasificar estas tipologías en función de sus características constructivas, piso térmico, tamaño y nivel de tecnificación, responde a una carencia que tienen actualmente los investigadores para referenciar sus trabajos y determinar el comportamiento de estas estructuras en función del bienestar, confort animal, impacto sobre el medio ambiente, entre otras.

Esta investigación tuvo como objetivo realizar una propuesta de tipologías constructivas para instalaciones porcícolas de cerdos para diferentes grupos etarios acorde al piso térmico, para el departamento Antioqueño que sirva para futuras investigaciones y como modelo a nivel nacional. El trabajo fue realizado en el departamento de Antioquia, el cual cuenta con el 62.8% de la producción nacional (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2016), de la cual el 70% se encuentra localizada en piso térmico frío concentrada principalmente en los municipios de Santa Rosa de Osos, Don Matías, Entreríos, Belmira, San Pedro de los Milagros y Yarumal (Gobernación de Antioquia, 2014)).

1.2 Materiales y métodos

1.2.1 Recopilación de la información

La metodología de recopilación de la información se dividió en tres etapas, en las dos primeras se aplicaron encuestas que buscaban recoger los conceptos individuales de diferentes expertos. En la primera fase se definió de granja porcícola tecnificada; en la segunda el tamaño de granja de acuerdo al grupo etareo y las características constructivas más utilizadas en el departamento de Antioquia con relación al confort térmico; generación, concentración y distribución de gases. Y en la tercera etapa se establecieron los criterios de categorización de las tipologías constructivas más viables de cada grupo etareo y en cada piso térmico.

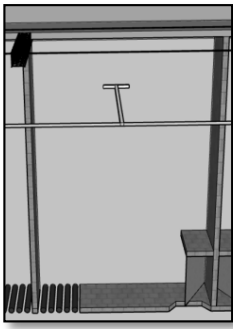
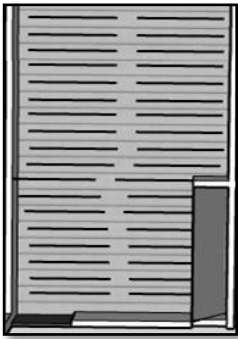
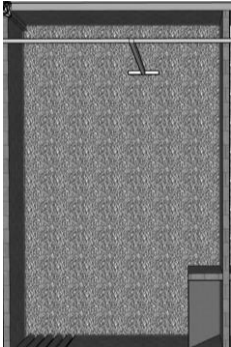
- Determinación del panel de expertos: El panel de expertos consultado para este trabajo estaba conformado por 8 profesionales de las ramas de ingeniería civil, veterinaria, zootecnia, entre otras, con experiencia en la construcción, investigación y manejo de alojamientos de cerdos en producciones en confinamiento.

- Desarrollo de los cuestionarios: En un primer momento con los expertos se envió un formato de encuesta descriptiva, con respuesta abierta, donde se les realizaron las siguientes consultas a los 8 expertos:
 - a. Por favor explique que es para usted una granja tecnificada.
 - b. Según su conocimiento como clasificaría el tamaño de la granja de acuerdo al número de animales.
 - c. De acuerdo a su experiencia indique las diferentes estructuras físicas que se pueden encontrar en función de: 1) material del piso; 2) Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas; 3) Estructuras de ventilación lateral; y 4) Estructura de ventilación en cubierta.

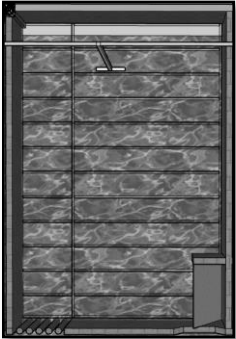
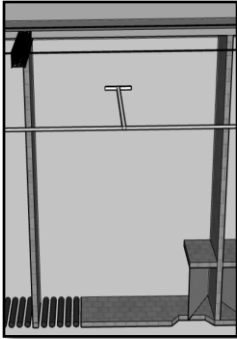
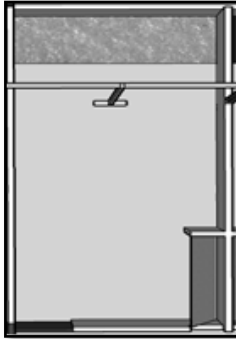

Un segundo cuestionario, construido con la información obtenida sobre las estructuras físicas del primero, presentó la siguiente estructura: 1) dos listados iguales y paralelos con las diferentes características donde se solicitó unir aquellas que eran excluyentes entre sí, y no eran viables en los diferentes pisos térmicos ; 2) una lista de las estructuras para cada grupo etareo donde se solicitó marcar las viables y más utilizadas en el departamento de Antioquia; y 3) se solicitó listar los principales criterios de decisión para determinar el diseño de un alojamiento.

Por último, se convocó a expertos, a un panel grupal para establecer los costos constructivos y de mantenimiento por metro cuadrado de cada una de las estructuras listadas y establecer una evaluación frente a la efectividad en mantener el confort térmico. La siguiente es la descripción de cada una de las características constructivas listadas por los expertos y utilizadas en las evaluaciones de acuerdo a cada una de las funciones

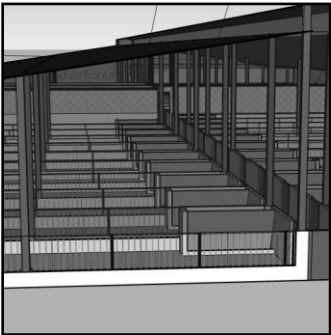
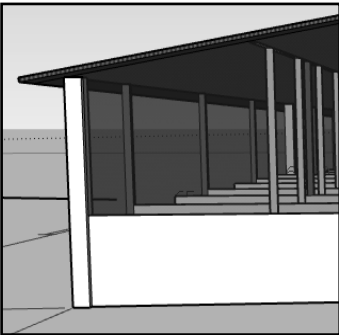
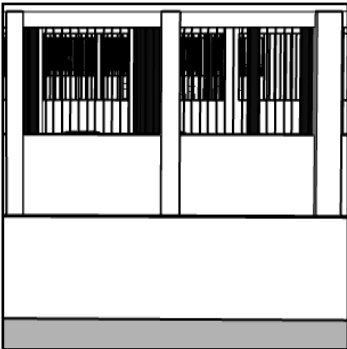
Material del piso:

Liso en concreto	Suelos enrejillados plásticos o en concreto	Cama profunda
<p>Piso en concreto con suficiente rugosidad para garantizar el buen soporte de los animales.</p>	<p>Son plaquetas conocidas comercialmente como slat, soportadas por una estructura metálica, su rejilla está diseñada para dejar pasar la excreta hacia una fosa en el subsuelo.</p>	<p>Son suelos blandos de material orgánico que debe ser cambiado regularmente ya que absorbe toda la excreta y orina del animal, los principales sustratos utilizados de acuerdo con los expertos son cascarilla de arroz, pulpa de café y cisco</p>
		


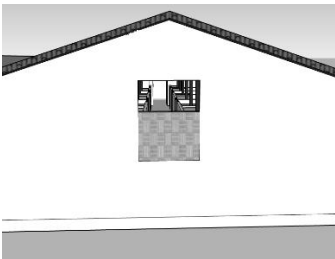

Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas:

Fosa	Liso en concreto	Piscina o charca	cárcamo
<p>Se encuentra asociada a un piso enrejillado, su estructura permite la evacuación de la porcinaza. Cuando cuenta con una lámina de agua se le denomina fosa inundable.</p>	<p>Piso en concreto con pendientes que oscilan entre el 3% y el 5% hacia la canal de evacuación de la porcinaza.</p>	<p>Lámina de agua de aproximadamente 1 m de ancho con una profundidad entre 12 y 15 cm al final del corral que permite al animal refrescarse.</p>	<p>Foso o canal para coleccionar las excretas líquidas de los animales, posee una trampa de sólidos constituida por una rejilla.</p>
			

Estructuras de ventilación lateral:

Corrales abiertos (sin muros)	Medio muro	Pequeñas ventanas
Son aquellas separaciones laterales con rejas que permite para aprovechar al máximo la ventilación natural con flujo cruzado.	Son aquellos muros, generalmente de 1.5 m de altura, que permiten la ventilación natural cruzada, pero protegen a los animales de altas velocidades del viento, estas aberturas pueden contar con cortinas para mayor protección cuando se requiera	Son aquellos corrales totalmente cerrados con muros y solo cuentan con ventanas para propiciar la ventilación que puede ser unilateral o cruzada, pueden contar con cortinas para mayor protección cuando se requiera
		

Estructura de ventilación en cubierta:

Sobretecho	Cerrado totalmente	Sobre puesto
También conocido como laternim, consta de una abertura en la cubierta con una protección sobre ella para cubrir el galpón de la lluvia, esta abertura tiene dos lados para aumentar la ventilación y expulsar gases.	Son aquellos que no cuentan con ningún tipo de ventilación	Abertura entre las dos aguas del techo, con diseño que impida el ingreso de la lluvia, solo un lado para aumentar la ventilación y expulsar gases.
		

- **Determinación de los pisos térmicos:** Para determinar los pisos térmicos se utilizó el censo nacional agropecuario del 2014 desarrollado por el ICA, el cual menciona a

Antioquia con 2038 granjas tecnificadas, localizadas entre los 2 y los 2600 msnm, la Tabla 1.2 muestra la clasificación de las instalaciones en función de la altura sobre el nivel del mar bajo la clasificación de Caldas – Lang. Se encontró que la mayor cantidad de granjas del departamento se encuentran localizadas entre los 1900 y los 2800 msnm representadas por un piso térmico frío, seguido de templado y cálido. No se registran granjas tecnificadas por encima de los 2800 msnm. Con estos resultados se determinó trabajar con los pisos térmicos cálido, templado y frío.

Tabla 1-2 Localización de las granjas en Antioquia de acuerdo al piso térmico

# de granjas	Distribución porcentual de	Piso Térmico
63	3,1%	Cálido
539	26,4%	Templado
1436	70,5%	Frio
0	0%	Muy frio
0	0%	Extremadamente frio
0	0%	Nival

1.2.2 Análisis

- Definición de granja tecnificada: con la información obtenida en el primer cuestionario se obtuvieron diferentes características para establecer la definición de granja tecnificada las cuales fueron valoradas de acuerdo al número de menciones realizadas por cada uno de los expertos.
- Tamaño de granja: Con los rangos de cada uno de los encuestados y el uso de herramientas de estadística descriptiva se determinaron los intervalos de confianza para categorizar las granjas de acuerdo a su tamaño y grupo etareo, y se construyó una propuesta.
- Determinación de las tipologías constructivas: Los listados de todas las posibles estructuras constructivas, grupos etareos y pisos térmicos, fueron sometidos a un cálculo de número posible de combinaciones utilizando el software estadístico R. Con los resultados de las características constructivas excluyentes y poco viables en los diferentes pisos térmicos, consultado con los expertos, se realizó una depuración inicial de combinaciones obteniendo solo aquellas combinaciones con viabilidad técnica y por

piso térmico. Los resultados se presentan mediante un análisis de sensibilidad de decisión de acuerdo al piso térmico en el cual se tuvieron en cuenta las estructuras excluyentes entre sí y aquellas que no son apropiadas para el clima. las relaciones viables se marcaron con un 1 y las que no tuvieron viabilidad con 0.

Los resultados de las estructuras de mayor viabilidad por cada grupo etareo fueron analizados mediante proceso de estadística descriptiva utilizando histograma para permitir una visualización ordenada de los mismos, en este punto se estableció como criterio de selección únicamente aquellas estructuras con tres o más votos y se desarrolló un análisis de posibles combinaciones para cada grupo etareo donde previamente se establecieron las estructuras excluyentes para obtener únicamente las combinaciones técnicamente viables y más aplicadas por los expertos.

- Selección de las tipologías más representativas: Con la finalidad de obtener las tipologías más viables por grupo etareo y piso térmico, se utilizó una ponderación basada en el consenso de expertos sobre la prioridad de los factores que típicamente se utilizan para agregar puntajes cuando se trabajan múltiples dimensiones denominado proceso de jerarquía analítica (AHP) (Ameen & Mourshed, 2019). Se seleccionaron tres criterios para la evaluación de las diferentes alternativas constructivas (Costo constructivo, costo de mantenimiento, y efectividad en mantener el confort térmico). Las características a evaluar se clasificaron por grupo etareo, función y piso térmico (Tabla 1-3). La metodología AHP utiliza la escala de importancia para la valoración de los criterios descrita en la tabla 1-4 y las ecuaciones 1, 2 y 3 para validar los resultados.

Tabla 1-3 Características a evaluar

Grupo etareo	Función	Piso térmico
Gestación	Material del piso	Frio
Cría	sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	Templado
Precebo	Estructura de ventilación lateral	Cálido
Levante y Ceba	Estructura de ventilación en cubierta	

Tabla 1-4 Escala de importancia relativa (1-9) de AHP (Ameen & Mourshed, 2019)

Escala numérica de importancia	Escala verbal	Explicación
1	Igualmente, importante	Dos elementos contribuyen en igual medida al objetivo
3	Moderadamente importante	Preferencia leve de un elemento sobre el otro
5	Fuertemente importante	Preferencia fuerte de un elemento sobre el otro
7	Importancia muy fuerte o demostrada	Mucha más preferencia de un elemento sobre otro. Predominancia demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte	Preferencia clara y absoluta de un elemento sobre el otro
2,4,6,8		Intermedio de los valores anteriores

Ecuaciones del método AHP:

1) Índice de consistencia

$$IC = \frac{n_{max} - n}{n - 1}$$

Donde

n_{max} = es el valor principal
 n = # de elementos evaluados

2) Índice de consistencia aleatoria

$$ICA = \frac{1.98 * (n - 2)}{n}$$

Donde

n = # de elementos evaluados

3) Relación de consistencia

$$RC = \frac{IC}{ICA}$$

Donde

$RC < 0.1$ relación consistente

1.2.3 Determinación de las tipologías constructivas de mayor viabilidad

Para determinar las tipologías constructivas de mayor viabilidad se utilizaron los resultados obtenidos con el análisis de sensibilidad de decisiones y análisis de jerarquización AHP, Con el segundo se determinó la importancia y con el primero la viabilidad de las combinaciones.

1.3 Resultados y discusión

1.3.1 Principales conceptos para determinar el nivel de tecnificación de una granja

De los conceptos de los expertos se obtuvieron 13 factores técnicos para clasificar a una granja como tecnificada. En la Tabla 1-5, se presenta la compilación de las respuestas de los expertos, en orden de importancia que determinan el grado de tecnificación de una granja porcícola, ocupando el primer lugar los procedimientos de tipo administrativo que permitan llevar a cabo el registro de variables relacionadas con los niveles de producción; en segundo lugar se encuentran la alimentación balanceada e implementación de un programa sanitario; y en tercer lugar resaltaron las instalaciones donde se alojan los animales las cuales deben contar con un diseño que garantice el confort de los animales. Los temas ambientales como el cumplimiento legal y la implementación de programas de gestión ambiental se encontraron 10 y 13 respectivamente, mostrando una baja relevancia frente a los parámetros que directamente afectan los niveles productivos.

Tabla 1-5 Factores Técnicos de una granja tecnificada

Valoración	Orden de importancia de los factores	Factores técnicos
6	1	Realizar registros de diferentes variables y, aunque no especificaron en el tipo de registros, un análisis a las demás respuestas permite inferir que los más importantes son: medidas de bioseguridad, parámetros zootécnicos, capacitaciones y cumplimiento legal
5	2	Ofrecer alimentación balanceada a los animales, se resalta que en Colombia son muy utilizados los alimentos concentrados de casas comerciales.
5	2	Implementar un programa sanitario o de bioseguridad
4	3	Instalaciones técnicas, con un predominio por la capacidad instalada y el confort animal
3	4	Bienestar animal
3	4	Programa de parámetros productivos
3	4	Acompañamiento veterinario
3	4	Capacitación de personal
2	5	Contar con certificaciones ICA 20148 de 2016 o la 2640 de 2007
2	5	Cumplimiento legal
2	5	Genética animal

Valoración	Orden de importan de los factores	Factores técnicos
1	6	Sacrificio legal
1	6	Programa de manejo ambiental

1.3.2 Propuesta de clasificación de tamaño de granja por grupo etareo

Dentro de un proceso de clasificación tipológica es importante determinar el tamaño de una granja dependiendo el número de animales y por grupo etareo. La tabla 1-6, presenta los resultados obtenidos por los expertos y la construcción de una propuesta de los autores que permita determinar una clasificación de tamaño de granja para el departamento de Antioquia, en función del número de animales. Es importante resaltar que los resultados de cría contemplan las etapas de gestación y cría ya que ambas deben estar en un mismo predio, pero en diferentes alojamientos.

Tabla 1-6 Clasificación de granjas de acuerdo al número de animales

CATEGORIZACIÓN POR TAMAÑO DE GRANJA								
Tipo de granja	Estadístico	Rango Pequeña		Rango Mediana		Rango Grande		Rango Extra
Gestación y Cría	Media	19	120	130	429	456	5167	
	mediana	10	99	100	450	451	5000	501
	Desviación estándar	29	130	156	322	384	4752	
	Alfa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	Intervalo	7	33	39	81	97	2240	
	Límite inferior	12	87	91	348	359	2926	
	Límite superior	27	152	169	509	553	7407	
	Propuesta del autor	20	200	201	1000	1001	5000	> 5000
Precebo	Media	59	327	361	1230	1313	3435	
	mediana	30	200	201	751	751	1750	1500
	Desviación estándar	85	414	505	1037	1233	3891	

2 Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones
 2 de engorde de cerdos en el departamento de Antioquia - Colombia

CATEGORIZACIÓN POR TAMAÑO DE GRANJA								
Tipo de granja	Estadístico	Rango Pequeña		Rango Mediana		Rango Grande		Rango Extra
	Alfa	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	Intervalo	21	104	127	261	310	1488	
	Límite inferior	38	223	234	969	1003	1947	
	Límite superior	81	431	488	1491	1623	4923	
	Propuesta del autor	60	200	201	800	801	5000	> 5000
	Media	104	586	665	2172	2338	8327	
	mediana	45	200	201	900	901	5000	1000
	Desviación estándar	175	865	1039	2280	2662	8965	
Levante - ceba	Alfa	1	1	1	1	1	1	
	Intervalo de confianza	44	218	261	573	669	4226	
	Límite inferior	60	368	404	1599	1669	4100	
	Límite superior	148	804	926	2746	3007	12553	
	Propuesta del autor	50	500	501	2000	2001	5000	> 5000

1.3.3 Determinación de las tipologías constructivas

Para determinar el número posible de tipologías constructivas de acuerdo a las principales variables que afectan el confort térmico y la generación de gases desde los alojamientos se presentan los siguientes resultados:

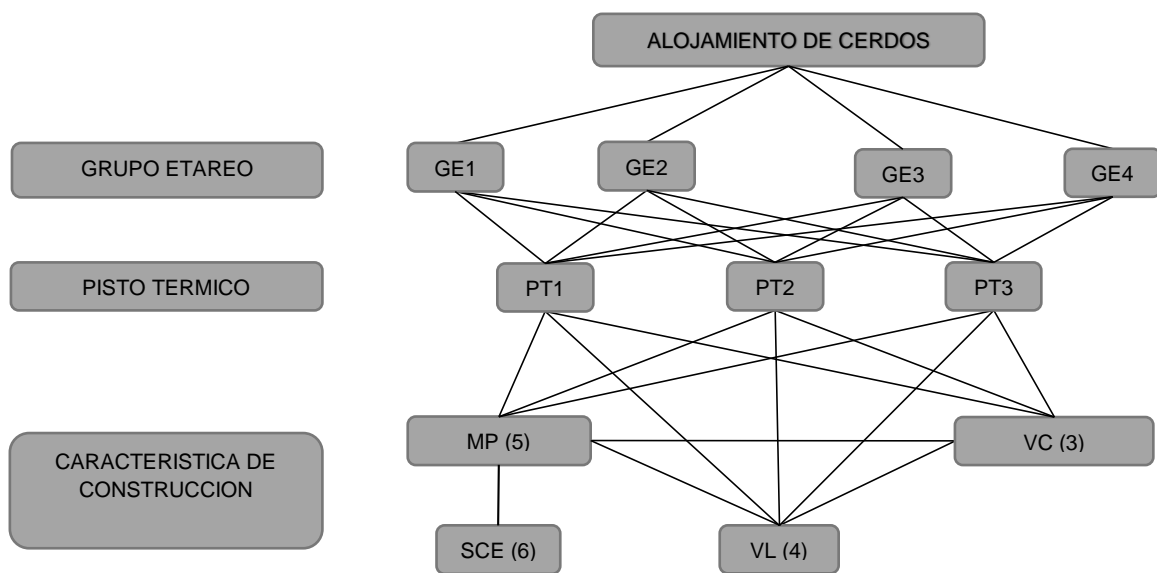
➤ **Determinación de variables técnicas evaluadas y clasificación tipológica:**

Las características constructivas que se tuvieron en cuenta para la clasificación de las tipologías constructivas se presentan en la tabla 1-7, cuya información fue valorada en función de las posibles combinaciones obteniendo 4320 posibles tipologías las cuales se representan en la Figura 1 estructura de todas las posibles combinaciones, de las cuales 948 son viables técnicamente de acuerdo con el análisis de sensibilidad representado en el árbol de decisiones de la figura 2 Análisis de sensibilidad de decisión de las diferentes alternativas.

Tabla 1-7 Variables para clasificación de tipologías constructivas

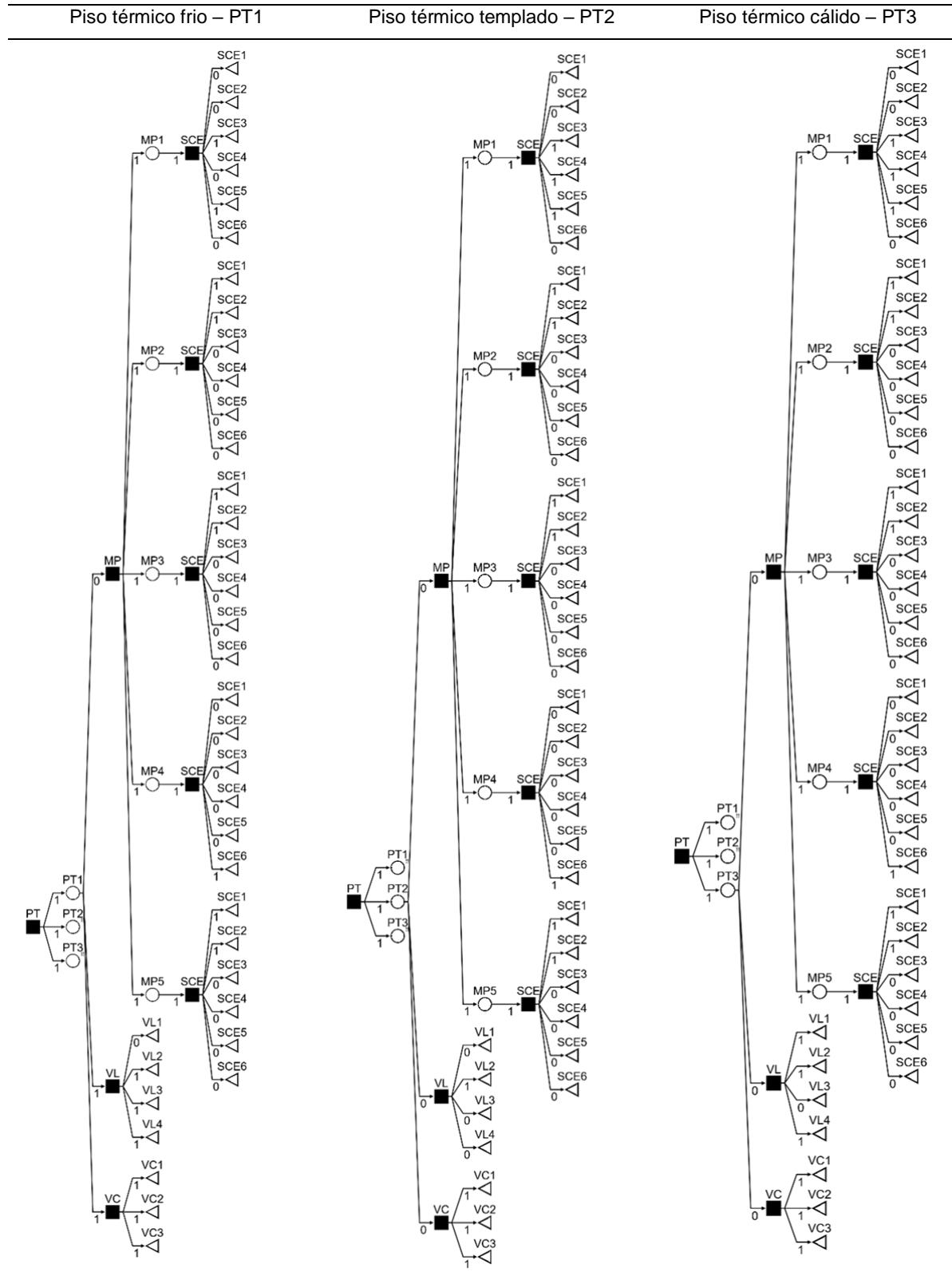
Grupo etario	Piso térmico		Características de Construcción									
			Material del piso		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas		Estructura de ventilación lateral		Estructura de ventilación en cubierta			
Gestación	GE1	Frio	PT1	Liso en concreto	MP1	Fosa inundada	SCE1	Corrales abiertos	VL1	Sobre techo	VC1	
Cría	GE2	Templado	PT2	Enrejillado plástico	MP2	Fosa no inundada	SCE2	Medio muro	VL2	Cerrado	VC2	
Precebo	GE3	Cálido	PT3			Liso concreto	SCE3	Pequeñas ventanas	VL3	Techo sobre puesto	VC3	
				Enrejillado concreto	MP3							
Levante – Ceba	GE4					Piscina o charca	SCE4	Sistemas automáticos de ventilación	VL4			
				Cama profunda	MP4							
				Combinado (duro y enrejillado)	MP5	cárcamo	SCE5					
						Material absorbente	SCE6					

Figura 1-1 Estructura de todas las posibles combinaciones



2 Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones
4 de engorde de cerdos en el departamento de Antioquia - Colombia

Figura 1-2 Análisis de sensibilidad de decisión de las diferentes alternativas

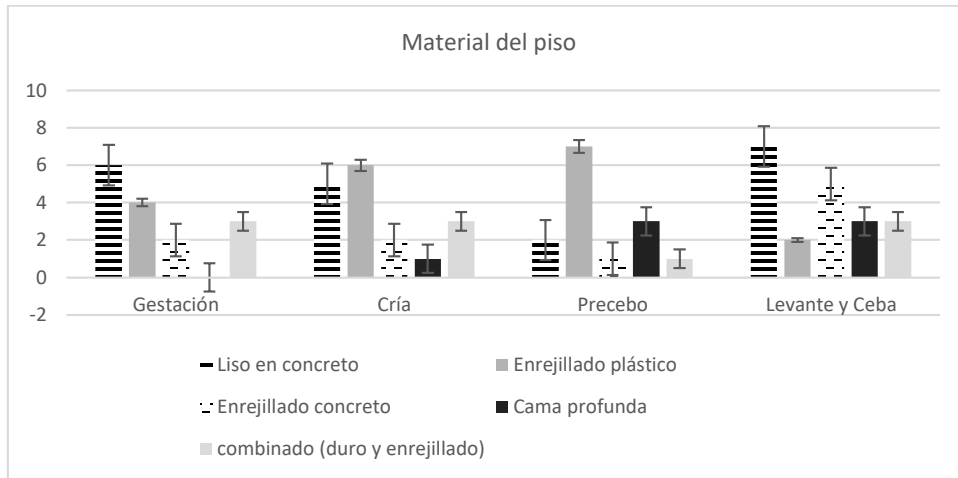


La figura 1-2 Análisis de sensibilidad de decisión de las diferentes alternativas, muestra las posibilidades de combinación para seleccionar tipologías más usadas en la producción porcícola del país por grupo etareo (GE). Se observa que dentro de la metodología el sistema de conducción de la porcina tiene una relación directa con el material de piso (SCE), y solo la piscina o charca (SCE4) presenta alteraciones de acuerdo al piso térmico (PT) ya que no es viable en climas fríos (PT1), la ventilación de la cubierta (VC) no presenta ninguna variabilidad. Por el contrario, las estructuras de ventilación lateral (VL) si se determinan de acuerdo al piso térmico donde se encuentre localizada la granja, presentando una relación inversa entre la temperatura y las áreas de ventilación, los corrales abiertos (VL1) no son viables en el piso térmico frío (PT1), las pequeñas ventanas (VL3) no presentan viabilidad en pisos térmicos cálidos (PT3) y los sistemas controlados de ventilación (VL4) no son viables en climas templados (PT2).

Para realizar una clasificación más precisa de las variables físicas constructivas más utilizadas se determinó evaluarlas de acuerdo a cada grupo etareo como se presenta a continuación:

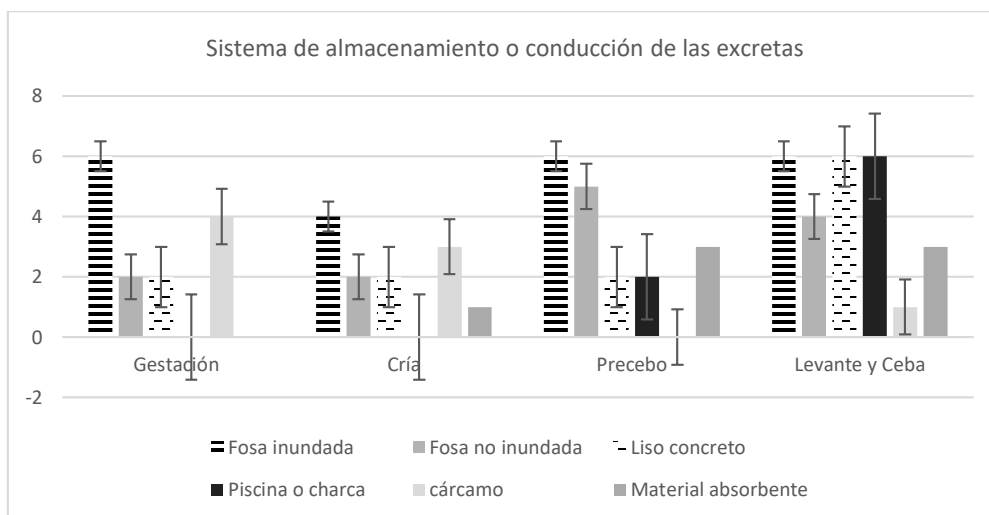
Material del piso: la figura 1-3 representa los materiales de piso más utilizados, se puede evidenciar que se priorizan los materiales duros de alta resistencia como el concreto en las etapas de gestación y levante y ceba donde se evidenciaron diferencias significativas frente a los demás materiales; el material plásticos como el enrejillado fue es el más utilizado en la etapa de precebo con diferencias significativas frente a los demás materiales, para la etapa de cría los materiales más utilizados fueron enrejillado plástico y concreto con una tendencia al primero. Aunque la cama profunda no es una técnica común en el departamento la etapa de levante y ceba es donde tiene una mayor aplicabilidad.

Figura 1-3 Material de piso por grupo etareo



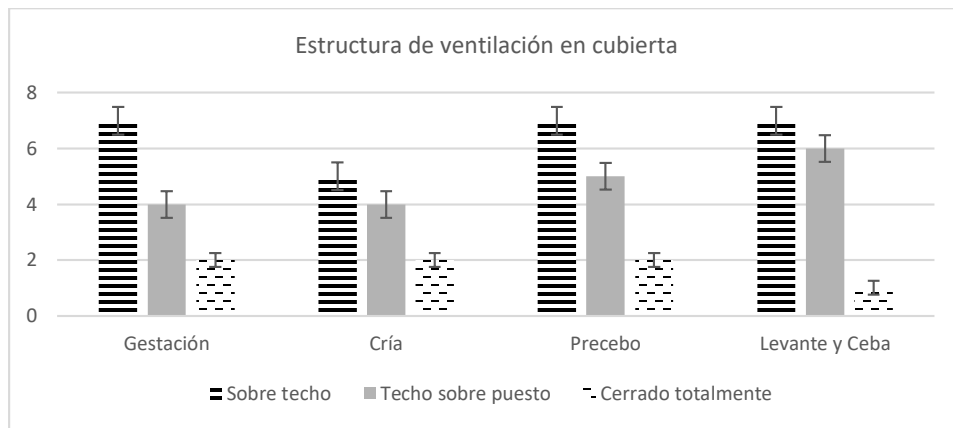
Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas: la figura 1-4 presenta los resultados de los tipos de estructuras de evacuación de excretas, las estructuras más utilizadas son fosa inundada en todas las etapas con diferencia significativa frente a las demás estructuras en la etapa de gestación, en la etapa de cría igualmente tiene diferencia significativa en conjunto con piso liso en concreto frente a las demás opciones; en precebo se evidencia una tendencia frente a fosa no inundada; y en Levante y Ceba predomina junto a liso en concreto y piscina o charca.

Figura 1-4 Tipos de estructuras de evacuación de excretas por grupo etareo



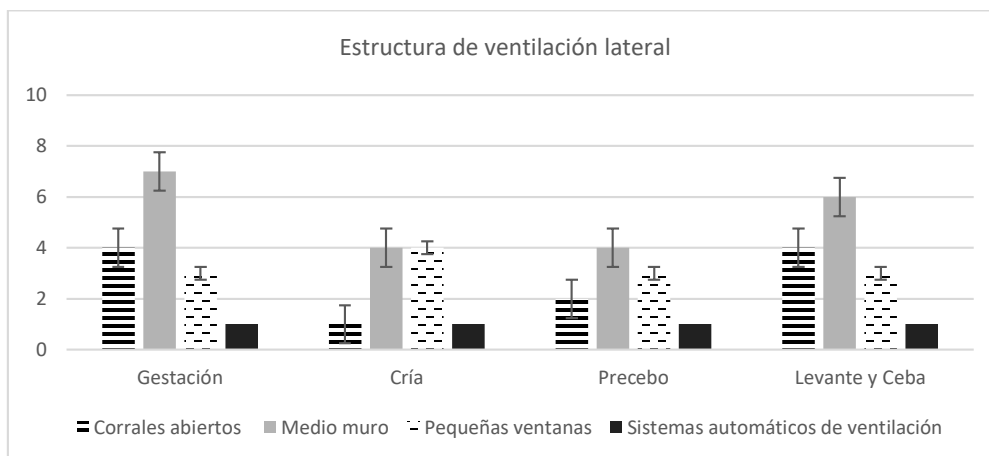
Estructura de ventilación en cubierta: de acuerdo con la figura 1-5 se puede evidenciar una mayor tendencia del sobretecho en todas las etapas, presentando diferencias significativas en gestación, precebo y levante y ceba; techo sobrepuesto es la segunda tendencia, por último, cubiertas cerradas totalmente predominantes en climas fríos según observaciones de expertos, en este punto es importante destacar que los municipios de mayor producción porcina en Antioquia se encuentran clasificados en clima frío.

Figura 1-5 Diseño de cubierta del techo



Estructuras de ventilación lateral: de acuerdo con la figura 6 se obtuvieron 4 tipos de estructuras laterales corrales abiertos, medio muro, pequeñas ventanas y sistemas automáticos de ventilación. De las alternativas los muros a alturas de 1.5 m catalogados como medio muro son los que presentan mayor tendencia con diferencias significativas en gestación y levante y ceba. Para la etapa de cría las existe una tendencia al uso del medio muro. La ventilación natural fue predominante y aunque un experto manifestó conocer en el departamento alojamientos con sistemas automáticos de ventilación, ninguno otro experto le dio importancia para el diseño de los alojamientos en Antioquia.

Figura 1-6 Estructura lateral



Teniendo en cuenta las estructuras más viables para cada grupo etareo se obtuvieron los siguientes resultados: 143 combinaciones tipológicas técnicamente viables e idóneas para los diferentes grupos etareo, de las cuales se destaca la versatilidad de las granjas de ceba que tienen el mayor número de posibles tipologías (70) debido a que es el alojamiento que utiliza mayor variabilidad de características constructivas seguido por los alojamientos para la etapa de gestación (30), cría (24), y por último la etapa de precebo (19) con la menor variabilidad.

Tabla 1-8 Posibles combinaciones por tipología constructiva

Combinaciones posibles				
Gestación	Cría	Precebo	Levante y Ceba	Total
30	24	19	70	143

Para determinar las combinaciones de mayor viabilidad por piso térmico y grupo etareo se definieron 3 criterios de evaluación y se ponderaron de acuerdo a la metodología AHP: 1) Efectividad de mantener el confort térmico de los animales (72.4%); 2) Costos de construcción (19.3%); y 3) Costos de mantenimiento (8.3%) como se muestra en la tabla 9. matriz de comparación normalizada, donde la relación de consistencia es de 0.084 dando como correcta la ponderación. Con los resultados de la matriz de comparación de los criterios se evaluaron las alternativas de material de piso; sistema de almacenamiento o conducción de las excretas; y estructuras de ventilación lateral y cubierta.

Tabla 1-9 Matriz de comparación normalizada

Criterios de evaluación	Efectividad en mantener el confort térmico	Costo constructivo	Costo de mantenimiento	Ponderación
Efectividad en mantener el confort térmico	0,74	0,79	0,64	0,724
Costo constructivo	0,15	0,16	0,27	0,193
Costo de mantenimiento	0,11	0,05	0,09	0,083

$$IC= 0,056$$

$$ICA= 0,66$$

$$RC= 0,08444$$

En la tabla 1-9 se presentan los resultados de ponderación de cada una de las alternativas evaluadas por grupo etareo, de acuerdo a los criterios de evaluación de la tabla 1-7.

Tabla 1-10 Resultados de jerarquización de las alternativas

Grupo etareo	Criterios de evaluación	Clasificación de las alternativas	Alternativas	Peso %
Gestación (GE1)	Efectividad de mantener el confort térmico de los animales	Material del piso (MP)	Liso en concreto (MP1)	42,5
			Enrejillados plástico (MP2)	30
			Combinado (liso y enrejillados) (MP5)	26,4
	Costos de construcción	Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas (SCE)	Fosa inundada (SCE1)	39,4
			Cárcamo (SCE5)	59,6
	Costos de	Estructura de ventilación lateral (VL)	Jaulas (sin muros) (VL1)	10
			Medio muro (VL2)	61,9
			Pequeñas ventanas (VL3)	27,5

3 Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones
0 de engorde de cerdos en el departamento de Antioquia - Colombia

Grupo etareo	Criterios de evaluación	Clasificación de las alternativas	Alternativas	Peso %
	mantenimiento	Estructura de ventilación en cubierta (VC)	Sobre techo (VC1)	73,5
			Techo sobre puesto (VC3)	25,5
Cría (GE2)	Efectividad de mantener el confort térmico de los animales	Material del piso (MP)	Liso en concreto (MP1)	6,2
			Enrejillados plástico (MP2)	54,1
			Combinado (liso y enrejillados) (MP5)	38,7
	Costos de construcción	Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas (SCE)	Fosa inundada (SCE1)	67,9
			Cárcamo (SCE5)	31,1
	Costos de mantenimiento	Estructura de ventilación lateral (VL)	Medio muro (VL2)	72,3
Pequeñas ventanas (VL3)			26,7	
		Estructura de ventilación en cubierta (VC)	Sobre techo (VC1)	73,5
			Techo sobre puesto (VC3)	25,5
Precebo (GE3)	Efectividad de mantener el confort térmico de los animales	Material del piso (MP)	Enrejillados plásticos (MP2)	80,8
			Cama profunda (MP4)	18,2
			Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas (SCE)	Fosa inundada (SCE1)
	Costos de construcción		Fosa no inundada (SCE2)	24,6
			Material absorbente (SCE6)	15,9
	Costos de mantenimiento	Estructura de ventilación lateral (VL)	Medio muro (VL2)	72,3
Pequeñas ventanas (VL3)			26,7	
		Estructura de ventilación en cubierta (VC)	Sobre techo (VC1)	73,5
			Techo sobre puesto (VC3)	25,5
Levante y Ceba (GE4)	Efectividad de mantener el confort térmico de los animales	Material del piso (MP)	Liso en concreto (MP1)	47,9
			Enrejillados concreto (MP3)	22,5
			Cama profunda (MP4)	13,5
	Costos de construcción	Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas (SCE)	Fosa inundada (SCE1)	22,9
			Fosa no inundada (SCE2)	20
			Liso concreto (SCE3)	11,6
		Piscina o charca (SCE4)	38,7	
		Material absorbente (SCE6)	22,1	

Grupo etareo	Criterios de evaluación	Clasificación de las alternativas	Alternativas	Peso %
	Costos de mantenimiento	Estructura de ventilación lateral (VL)	Jaulas (sin muros) (VL1)	10
			Medio muro (VL2)	61.9
			Pequeñas ventanas (VL3)	27.5
		Estructura de ventilación en cubierta (VC)	Sobre techo (VC1)	73,5
			Techo sobre puesto (VC3)	25,5

En la tabla 1-10 se puede evidenciar que las instalaciones de cría y precebo tienen unos patrones similares en cuanto al requerimiento de los alojamientos, al igual que gestación y levante y ceba, la explicación puede estar dada por la vulnerabilidad de los animales pequeños a las condiciones climáticas por lo cual requieren de una mayor protección. Con los resultados de las estructuras ponderadas y el análisis de sensibilidad de decisión figura 2 se construye una propuesta de 3 tipologías constructivas de acuerdo al grupo etareo y al piso térmico, la 1 corresponde a la combinación de las alternativas de mayor viabilidad, las 2 y 3 tipologías corresponden a combinaciones posibles.

Tabla 1-11 Propuesta de tipologías constructivas de acuerdo al grupo etareo y piso térmico

Grupo Etareo	Piso térmico	Clasificación de la Alternativa	Tipologías		
			1	2	3
Gestación	Frio	Material del piso	MP1	MP2	MP5
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE5	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL3	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Templado	Material del piso	MP1	MP2	MP5
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE5	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Cálido	Material del piso	MP1	MP2	MP5
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE5	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL1	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1

3 Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones
 2 de engorde de cerdos en el departamento de Antioquia - Colombia

Grupo Etareo	Piso térmico	Clasificación de la Alternativa	Tipologías		
			1	2	3
Cría	Frio	Material del piso	MP2	MP5	MP1
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL3	VL3	VL3
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Templado	Material del piso	MP2	MP5	MP1
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Cálido	Material del piso	MP2	MP2	MP5
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE1	SCE5
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
Precebo	Frio	Material del piso	MP2	MP4	MP2
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE6	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL3	VL3	VL3
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC3
	Templado	Material del piso	MP2	MP4	MP2
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE6	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Cálido	Material del piso	MP2	MP4	MP2
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE1	SCE6	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1

Grupo Etareo	Piso térmico	Clasificación de la Alternativa	Tipologías		
			1	2	3
Levante y Ceba	Frio	Material del piso	MP1	MP5	MP3
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE3	SCE1	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL3	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Templado	Material del piso	MP1	MP5	MP3
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE3	SCE1	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL2	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1
	Cálido	Material del piso	MP1	MP5	MP3
		Sistema de almacenamiento o conducción de las excretas	SCE4	SCE1	SCE2
		Estructura de ventilación lateral	VL2	VL1	VL2
		Estructura de ventilación en cubierta	VC1	VC3	VC1

la tabla 11 Propuesta de tipologías constructivas de acuerdo al grupo etareo y al piso térmico presenta una propuesta de tipologías constructivas que más se adapta a cada grupo etareo y piso térmico, buscando mejorar las condiciones de confort térmico animal, mejor manejo de subproductos y mitigación en la generación de gases. Se proponen entonces tres alternativas por grupo etareo y por piso térmico para un total de 36 alternativas. Estas fueron obtenidas a partir de los resultados de priorización de la tabla 10 Resultados de jerarquización de las alternativas, que define mayores pesos ponderados.

1.4 Conclusiones

Los diseños de los alojamientos de cerdos se encuentran definidos de acuerdo al piso térmico y el grupo etareo de los animales, se pudo evidenciar la existencia de estructuras muy específicas para cada uno de estos criterios. Se obtuvieron parámetros para describir el concepto de granja tecnificada dentro de los cuales los más relevantes son: medidas de bioseguridad, medición de parámetros zootécnicos, desarrollo de capacitaciones al personal y cumplimiento legal. los rangos para establecer el tamaño de granja de acuerdo al número de animales por grupo etareo son: 1) Cría pequeña (50 – 200), mediana (201 – 1000) y grande (1001 – 5000); 2) Precebo pequeña (60– 200), mediana (201 – 800) y

grande (801 – 5000); y 3) Levante – ceba pequeña (50 – 500), mediana (501 – 1000) y grande (2001 – 5000). Se identificaron 4.320 combinaciones tipológicas iniciales y se determinó un total de 948 con factibilidad. La investigación mostró que el piso térmico y el grupo de edad se consideran factores relevantes para el diseño de las instalaciones de producción porcina. Las instalaciones de engorde presentan una gran variabilidad de las diferentes características constructivas, en contraste con las instalaciones de cría y crecimiento donde las estructuras son más homogéneas incluso en diferentes pisos térmicos. además, las estructuras utilizadas en la cría y el crecimiento buscan mantener el calor de las instalaciones para proteger a los animales de las condiciones climáticas debido a su corta edad, mientras que en la gestación y engorde las estructuras utilizadas buscan contribuir a la ventilación del lugar. Se clasificaron 36 tipologías de construcción como las más factibles para ser implementadas en el departamento de Antioquia y el país colombiano, logrando una primera clasificación tipológica para el sector porcino en climas tropicales. Servirá de base para la legislación y de referencia para futuros trabajos de investigación.

Se espera que este trabajo sirva para futuras investigaciones sobre los impactos de las diferentes tipologías constructivas en el bienestar animal y el medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS. Este informe es el resultado de una colaboración entre la Facultad de Ciencias Agrarias y el Laboratorio de Bioclimática Aplicada a la Agroindustria de la Universidad Nacional de Colombia.

1.5 Referencias

- Ameen, R. F. M., & Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process. *Sustainable Cities and Society*, 44(October 2018), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.020>
- Bjerg, B., Brandt, P., Sørensen, K., Pedersen, P., & Zhang, G. (2019). Review of methods to mitigate heat stress among sows. *2019 ASABE Annual International Meeting, June*.

- <https://doi.org/10.13031/aim.201900741>
- Bjerg, B., Demeyer, P., Hoyaux, J., Didara, M., Grönroos, J., Hassouna, M., Amon, B., Bartzanas, T., Sándor, R., Fogarty, M., Klas, S., Schiavon, S., Juskiene, V., Radeski, M., Attard, G., Aarnink, A., Gülzari, Ş. Ö., Kuczyński, T., Figueiro, D., ... Norton, T. (2019). Review of legal requirements on ammonia and greenhouse gases emissions from animal production buildings in european countries. *2019 ASABE Annual International Meeting, June, 23*. <https://doi.org/10.13031/aim.201901070>
- Briukhanov, A., Subbotin, I., Uvarov, R., & Vasilev, E. (2017). Method of designing of manure utilization technology. *Agronomy Research, 15*(3), 658–663.
- Broucek, J. (2018). *Nitrous Oxide Release from Poultry and Pig Housing. 27*(2), 467–479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75871>
- Castrillón, N., González, V., Osorio, J. A., Montoya, A. P., & Correa, G. (2020). Assessment of the methane emission for different typologies of fattening swine facilities in the department of antioquia Colombia. *Agronomy Research, 18*(Special Issue 2), 1189–1202. <https://doi.org/10.15159/AR.20.108>
- Cecchin, D., Pereira, C. R., Campos, A. T., Ferraz, P. F. P., Amaral, P. I. S., Sousa, F. A., Hüther, C. M., & Cruz, V. M. F. (2019). Behavior of swine hosted in facilities with different construction typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology, 7*(1), 6–10. <https://doi.org/10.31893/2318-1265jabb.v7n1p6-10>
- Cecchin, D, Campos, A., Cruz, V., Sousa, F., Amaral, P., & Yanagi Junior, T. (2017). Air quality in swine growing and finishing facilities with different building typologies TT - Qualidade do ar em instalações para suínos em crescimento e terminação com diferentes tipologias construtivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 21*(5), 339–343. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p339-343>
- Cecchin, Daiane, Da Cruz, V. F., Campos, A. T., Sousa, F. A., Amaral, P. I. S., Da Silva Ramos Freitas, L. C., & Andrade, R. R. (2017). Thermal environment in growing and finishing pig facilities of different building typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology, 5*(4), 118–123. <https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v5n4p118-123>

CIGR. (2006). *ANIMAL HOUSING IN HOT CLIMATES: A multidisciplinary view* (I. de A. Nääs & D. J. Moura (eds.)). CIGR.

de Oliveira Júnior, A. J., de Souza, S. R. L., da Cruz, V. F., Vicentin, T. A., & Glavina, A. S. G. (2018). Development of an android APP to calculate thermal comfort indexes on animals and people. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(October 2017), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.014>

de Vries, M., & de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). *3rd National Agricultural Survey, Colombia*.

Dominica, I., Suharjito, Noviantri, V., & Utama, D. N. (2018). Thermal comfort modelling based on house's architecture using ghost point quadratic explicit method. *International Review of Civil Engineering*, 9(4), 141–147. <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.14417>

Ferrari, S., Costa, A., & Guarino, M. (2013). Heat stress assessment by swine related vocalizations. *Livestock Science*, 151(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.10.013>

Gabriel, D., Allen, A., Bastviken, D., Conrad, R., Gudasz, C., St-Pierre, A., Thanh-Duc, N., & Del Giorgio, P. A. (2014). Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507(7493), 488–491. <https://doi.org/10.1038/nature13164>

Gerber, P. ., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Facing climate change through livestock*.

Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>

Gobernación de Antioquia. (2014). *Anuario estadístico del sector agropecuario en el*

departamento de Antioquia.

Hansen, R., & Bjerg, B. (2018). *Natural ventilation's ability to prevent high indoor temperatures. m*(April).

Huerta_Crispin, R., & Gas, J. (2012). Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos. In *Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos.*

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). *National Inventory of Greenhouse Gases (GHG) Colombia 2012.*

Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2005). Atlas climatológico de Colombia. *Atlas Climatológico de Colombia*, 219. <http://www.ideam.gov.co/>

Jackson, P., Guy, J. H., Sturm, B., Bull, S., & Edwards, S. A. (2018). An innovative concept building design incorporating passive technology to improve resource efficiency and welfare of finishing pigs. *Biosystems Engineering*, 174, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.008>

Lenerts, A., Popluga, D., & Naglis-Liepa, K. (2019). Benchmarking the GHG emissions intensities of crop and livestock–derived agricultural commodities produced in Latvia. *Agronomy Research*, 17(5), 1942–1952. <https://doi.org/10.15159/AR.19.148>

Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. ., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016a). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agricola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>

Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. M., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016b). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agricola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>

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>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2019). National Agroclimatic Report May 2019. In *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)* (Vol. 53).

Monteny, G. J., Bannink, A., & Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(2–3), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.015>

Myer, R., & Bucklin, R. (2012). Influence of Hot-Humid Environment on Growth Performance and Reproduction of Swine 1 Methods to Minimize Heat Stress. *University of Florida, IFAS Extension. AN 107*, 1–8.

Nations Food and Agriculture - FAO. (2011). World Livestock 2011 - Livestock in food security World. In *FAO*. <https://doi.org/10.1080/00036841003742587>

Noya, I., Villanueva-Rey, P., González-García, S., Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., & Moreira, M. T. (2017). Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4327–4338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.160>

Noya, Isabel, Aldea, X., Gasol, C. M., González-García, S., Amores, M. J., Colón, J., Ponsá, S., Roman, I., Rubio, M. A., Casas, E., Moreira, M. T., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. *Journal of Environmental Management*, 171, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.039>

OCDE/FAO. (2013). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.

Osorio-Saraz, J. A., Ferreira-Tinoco, I. D. fatima, Gates, R. S., Oliveira-Rocha, K. S., Combatt-Caballero, E. M., & Campos-de-Sousa, F. (2014). Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. *Dyna*, 81(187), 137–143. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40806>

Petersen, S. O., Olsen, A. B., Elsgaard, L., Triolo, J. M., & Sommer, S. G. (2016). Estimation

- of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. *PLoS ONE*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>
- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79(November 2018), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Philippe, F X., Laitat, M., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2012). Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.006>
- Philippe, F X., Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2013). Influence of permanent use of feeding stalls as living area on ammonia and greenhouse gas emissions for group-housed gestating sows kept on straw deep-litter. *Livestock Science*, 155(2–3), 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.005>
- Philippe, F X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Philippe, François Xavier, Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3–4), 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012>
- Pietrosemoli, S., & Tang, C. (2020). Animal welfare and production challenges associated with pasture pig systems: A review. *Agriculture (Switzerland)*, 10(6), 1–34. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060223>
- Porkcolombia, & PigCHAMP. (2015). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*. (p. 34).
- Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2013). Life Cycle Assessment of pork production: A data inventory for the case of Germany. *Livestock Science*, 157(2–3), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.001>

- Reimert, I., Rodenburg, T. B., Ursinus, W. W., Kemp, B., & Bolhuis, J. E. (2014). Selection based on indirect genetic effects for growth, environmental enrichment and coping style affect the immune status of pigs. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108700>
- Rhodes, T., Appleby, M., Chinn, K., Douglas, L., Firkins, L., Houpt, K., Irwin, C., McGlone, J., Dundberg, P., Tokach, L., & Wills, R. (2005). A comprehensive review of housing for pregnant sows Members - Task Force Report. *Javma*, 227(10), 1580–1590.
- Rodrigues, N. E. B., Zangeronimo, M. G., & Fialho, E. T. (2010). Suínos Sob Estresse Térmico. *Revista Eletrônica Nutritime*, 7(2), 1197–1211.
- Ross, J. W., Hale, B. J., Gabler, N. K., Rhoads, R. P., Keating, A. F., & Baumgard, L. H. (2015). Physiological consequences of heat stress in pigs. *Animal Production Science*, 55(11–12), 1381–1390. <https://doi.org/10.1071/AN15267>
- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., LeRoy Miller, H. jr, & Chen, Z. (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis. In *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York* (Issues 1–4). <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6>
- Sedorovich, D. M., Rotz, A., & Richard, T. L. (2007). Greenhouse gas emissions from dairy farms. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers*, 9, 14. <https://doi.org/10.13031/2013.23112>
- Seibert, L., & Norwood, F. B. (2011). Production costs and animal welfare for four stylized hog production systems. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/10888705.2011.527596>
- Sharpe, R. ., Harper, L. ., & Simmons, J. . (2001). Methane emission from swine houses in North Carolina. *Chemosphere Global Change Science*, 3, 1–6.
- Sousa, F. C., Tinôco, I. F. F., Barbari, M., Baptista, F., Souza, C. F., Saraz, A. O., Coelho, D. J. R., & Silva, A. L. (2018). Diagnosis of air quality in broilers production facilities in hot climates. *Agronomy Research*, 16(2), 582–592. <https://doi.org/10.15159/AR.18.070>

-
- Steinfeld, H., & Gerber, P. (2010). Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18237–18238. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107>
- USDA. (2011). *Department of agriculture national agricultural statistics service agricultural - Agricultural Statistics 2010*. 1–9.
- XIONG, Y., MENG, Q. shi, GAO, J., TANG, X. fang, & ZHANG, H. fu. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0)

2. Capítulo 2

Evaluación de la variabilidad espacial de las condiciones de confort térmico en diferentes tipologías de producción porcina en condiciones tropicales

Resumen. Este estudio tuvo como objetivo evaluar en confort térmico de diez instalaciones de producción porcina. Las instalaciones se ubicaron en el departamento de Antioquia - Colombia, entre los 800-2300 msnm de alturas, emplearon principalmente ventilación natural como estrategia de refrigeración, como es común en países tropicales, y pertenecían exclusivamente a la etapa de ceba. Se calcularon los índices de humedad y temperatura de globo negro (BGHI) y el Índice de Humedad y Temperatura (THI) para cada una de las instalaciones encontrando resultados entre los rangos 78 ± 5 - 68 ± 2 y 79 ± 4 - 69 ± 3 respectivamente. Se estableció que el 60% de las tipologías constructivas presentan condiciones de estrés térmico asociadas a variables climáticas y diseño de los alojamientos. Se analizaron las correlaciones entre las tipologías constructivas de las instalaciones, piso térmico, THI y BGHI. Los datos se estudiaron mediante estadística descriptiva, análisis de varianza y mapas de contorno.

Palabras clave: índice de confort, BGHI, THI, estrés térmico, bienestar animal, ventilación natural, porcicultura.

2.1 Introducción

En sistema de crianza intensiva de cerdos y el ambiente de los alojamientos tiene una influencia directa en el bienestar de los animales (Daiane Cecchin et al., 2017). el estrés por calor es ampliamente reconocido como una condición que afecta el bienestar animal (Ferrari et al., 2013), y es posible describirlo como el estado en el que un animal vive en armonía con su entorno (XIONG et al., 2017). La producción porcina en confinamiento requiere de actividades de manipulación a los animales que les pueden generar estrés agudo como castración, ataque de cola, destete, reagrupación y transporte (Reimert et al., 2014), adicionalmente, los alojamientos mal diseñados los pueden llevar a experimentar condiciones climáticas extremas debido al ambiente cerrado, mala calidad del aire, contacto con humedad permanente (Ferrari et al., 2013), altas concentraciones de gases como el amoniaco (NH_3), metano (CH_4), sulfuro de hidrogeno (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2) (CIGR, 2006) (Osorio-Saraz et al., 2014). Lo mencionado puede llegar a causar en los animales altas mortalidades y morbilidades, cambios en el comportamiento y fisiológicos, reducción en el consumo de alimento (Daiane Cecchin et al., 2017), y para los productores bajos parámetros reproductivos (Ross et al., 2015).

Los cerdos han sido considerados como animales homeotermos (Ross et al., 2015), las variables termo-ambientales que más impacto tienen son la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire (Daiane Cecchin et al., 2017), debido a que afectan el intercambio de calor entre el animal y su medio circundante (Machado et al., 2016b). Las características fisiológicas que hacen que estos individuos sean particularmente sensibles a las variables climáticas y puedan sufrir de estrés térmico son: la carencia de glándulas sudoríparas y una gruesa capa de tejido adiposo subcutáneo que actúa como una capa de aislamiento muy eficaz (Ross et al., 2015), particularidades que retan a los expertos a diseñar alojamientos bajo parámetros de un entorno térmico ideal también conocido como “zona de confort térmico” donde se pueda obtener la máxima productividad (Dominica et al., 2018). Los requerimientos de temperatura de los cerdos varían de acuerdo a la etapa en que se encuentren, los recién nacidos requieren temperaturas de $35\text{ }^\circ\text{C}$ y van disminuyendo a medida que crece el cerdo hasta llegar a $18\text{ }^\circ\text{C}$ para animales adultos; el cerdo depende de la pérdida de calor por evaporación para tratar de mantenerse fresco en ambientes

calurosos (Myer & Bucklin, 2012), para lo cual requiere de rangos de humedad entre el 50 y 80% (XIONG et al., 2017); por último, se destaca la velocidad del aire que puede propiciar el enfriamiento de los animales por el fenómeno de convección, siempre que la temperatura del aire esté por debajo de la temperatura de la piel (cuerpo) del animal (Bjerg, Brandt, et al., 2019).

El estrés térmico se ha visto intensificado o ha tomado más relevancia debido a: 1) el cambio climático; 2) aumento de la producción en regiones tropicales del mundo y; 3) a una mayor capacidad genética de acumulación de tejido magro y la fecundidad (Ross et al., 2015). Las características constructivas de los alojamientos de los animales, puede condicionar el ambiente térmico (Machado et al., 2016b) y un buen diseño puede ayudar a lograr en confort, al tener presente conceptos de diseño como: el material del piso, el sistema de conducción de la porcina, la cubierta y la estructura lateral, ya que tienen una alta influencia en el intercambio térmico gracias al fenómeno de conducción, convección y radiación (Dominica et al., 2018). se debe tener en cuenta que los diseños de los alojamientos deben adaptarse a las características climáticas del emplazamiento, siempre buscando propender que ocurran los fenómenos físicos que más ayuden al confort de los animales. Un estudio referente a una revisión multidisciplinaria sobre las diferencias en características constructivas de mayor relevancia para el confort animal entre zonas con estaciones muy marcadas y aquellas subtropicales o tropicales, se encontró que en la primera, la mayoría de los animales se mantienen en edificios cerrados, con ventilación mecánica / natural y normalmente aislada, donde se trabaja con sistemas de control climático para mantener la temperatura interior y la humedad relativa pero en los calurosos días de verano, los problemas de aclimatación con temperaturas excesivas son idéntico a los problemas en zonas subtropicales (CIGR, 2006). En las zonas tropicales y subtropicales, muchos edificios de animales tienen lados abiertos y no están aislados garantizando una ventilación natural (Hansen & Bjerg, 2018).

Existen diferentes metodologías para caracterizar o identificar las zonas de confort térmico adecuadas para la especie porcina, una de las más aplicada son la evaluación de los “Índices de confort térmico” (Daiane Cecchin et al., 2017), los cuales se representan en un valor adimensional de los factores que caracterizan el ambiente térmico y la respuesta del animal, dos de los índices más utilizados son temperatura y humedad (THI) desarrollado por Thom (1958) (Machado et al., 2016b), temperatura y humedad de globo negro (BGHI)

(Daiane Cecchin et al., 2017). En Colombia, existen pocas investigaciones frente al confort animal, razón que motivo esta investigación que tiene como objetivo evaluar el ambiente térmico de granjas porcícolas con diferente tipología constructiva que trabajan con ventilación natural localizadas en el departamento de Antioquia, departamento donde se concentra alrededor del 40% de la producción porcícola a nivel nacional (ICA, 2019; Porkcolombia, 2019).

2.2 materiales y métodos

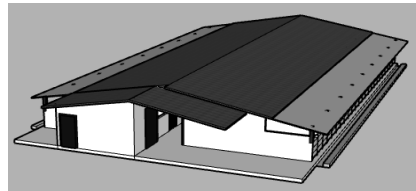
2.2.1 Localización y caracterización del área de estudio

La zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Antioquia en Colombia, territorio donde se concentra la mayor producción de porcinos a nivel nacional (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2016). Fueron seleccionadas aleatoriamente 10 granjas porcícolas, comprendidas en un rango de altura sobre el nivel del mar entre los 810 a 2236 metros. Se realizó una clasificación en tres pisos térmicos a partir del modelo climatológico de Caldas Lang. Las granjas elegidas son granjas tecnificadas de acuerdo a definición de la Resolución ICA 2640 de 2007 reglamentación colombiana. Los datos asociados a las granjas tales como tipología, municipio, orientación, tipo de ventilación, materiales de construcción y altura sobre el nivel del mar, se encuentran descritos en la tabla 2-1 la cual fue propuesta por (Castrillón et al., 2020). El experimento fue realizado en los meses de junio y agosto meses de mayor temperatura del año en Colombia, período de verano para clima tropical.

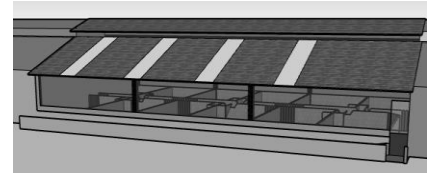
Tabla 2-1 Descripción de las diferentes tipologías constructivas. (Castrillón et al., 2020)

Tipología 1

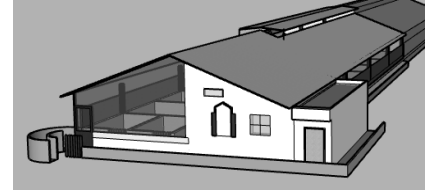
Piso térmico: Frío
Altura sobre el nivel del mar: 2174 m
Temperatura: 21.2°C
Humedad Relativa: 76%
Unidad Animal: 18.7



Tipología 2 Piso térmico: Templado
Altura sobre el nivel del mar: 1179 m
Temperatura: 27.8°C
Humedad Relativa: 67.8%
Unidad Animal: 31.0



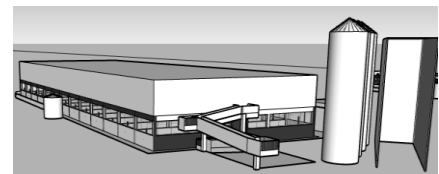
Tipología 3 Piso térmico: Templado
Altura sobre el nivel del mar: 1481m
Temperatura: 25.9°C
Humedad Relativa: 65.8%
Unidad Animal: 30.2



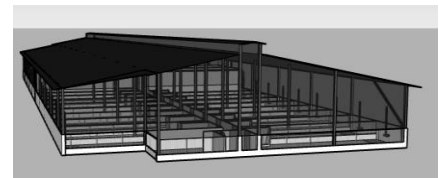
Tipología 4 Piso térmico: Frío
Altura sobre el nivel del mar: 2202m
Temperatura: 22.7°C
Humedad Relativa: 61.4%
Unidad Animal: 23.9



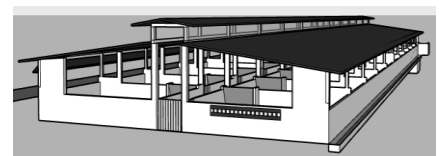
Tipología 5 Piso térmico: Templado
Altura sobre el nivel del mar: 1504m
Temperatura: 26.0°C
Humedad Relativa: 63.0%
Unidad Animal: 137.8



Tipología 6 Piso térmico: Cálido
Altura sobre el nivel del mar: 816m
Temperatura: 29.1°C
Humedad Relativa: 62.2%
Unidad Animal: 66.5

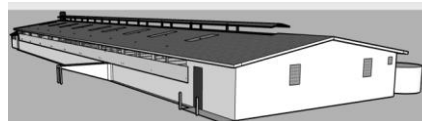


Tipología 7 Piso térmico: Templado
Altura sobre el nivel del mar: 1732m
Temperatura: 25.0°C
Humedad Relativa: 64.3%
Unidad Animal: 73.8



Tipología 8

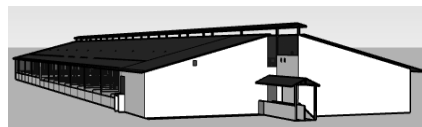
Piso térmico: Frío
 Altura sobre el nivel del mar: 2236m
 Temperatura: 21.8°C
 Humedad Relativa: 66.7%
 Unidad Animal: 72.1

**Tipología 9**

Piso térmico: Templado
 Altura sobre el nivel del mar: 1408m
 Temperatura: 26.2°C
 Humedad Relativa: 62.2%
 Unidad Animal: 49.5

**Tipología 10**

Piso térmico: Templado
 Altura sobre el nivel del mar: 1112m
 Temperatura: 28.4°C
 Humedad Relativa: 60.6%
 Unidad Animal: 164.9



2.2.2 Características de los animales evaluados

Las unidades de estudio correspondieron a granjas comerciales de engorde porcino, estos animales son un cruce entre las razas Landrace y Yorkshire, genéticamente conocidas como F1 (Primera generación de un cruce de razas puras). Todos los sistemas productivos estudiados tuvieron el mismo manejo nutricional con alimento concentrado balanceado, contaban con toda la dotación necesaria (comederos y bebederos) y zona seca diferenciada de la húmeda y ventilación natural.

2.2.3 Equipos utilizados

Para la medición de las variables evaluadas, se utilizaron equipos como anemómetro, termohigrómetro y termómetro de globo negro. Sus nombres comerciales y características técnicas asociadas a los instrumentos son descritos en la tabla 2-2. Los equipos fueron

suministrados y calibrados por el Laboratorio de Bioclimática de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

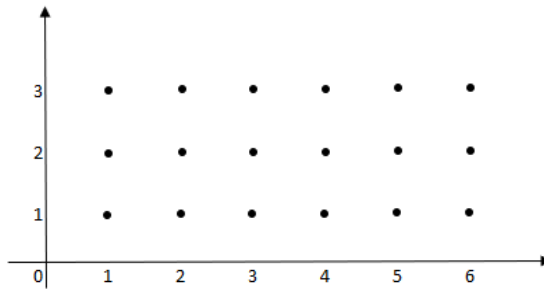
Tabla 2-2 Equipos utilizados.

Equipo	VARIABLES	Exactitud y precisión
Windsonic Ultrasonic Wind sensor (anemometro)	Velocidad y Dirección del viento bidireccional (m/s, °)	<u>Velocidad del viento</u> Rango 0-60m/s Precisión $\pm 2\%$ @ 12m/s Resolución 0.01m/s (0.02 knots) Tiempo de respuesta 0.25 segundos Umbral 0.01 m/s
		<u>Dirección del viento</u> Rango 0-359° (no dead band) Precisión $\pm 2^\circ$ @ 12m/s Resolución 1° Tiempo de respuesta 0.25 segundos
HD 32.2 32.3 (termómetro de globo negro)	Temperatura de globo negro, de bulbo húmedo y del aire (°C)	<u>Temperatura de globo negro</u> Rango 10-100 °C Precisión 1/3 DIN Resolución 0.1°C Tiempo de respuesta 15 minutos
		<u>Temperatura de bulbo húmedo</u> Rango 40-80 °C Precisión 1/3 DIN Resolución 0.1°C Tiempo de respuesta 15 minutos
		<u>Temperatura del aire</u> Rango -40-100 °C Precisión 1/3 DIN Resolución 0.1°C Tiempo de respuesta 15 minutos
Termohigrometro	Temperatura y Humedad Relativa (°C, %)	<u>Temperatura</u> Rango -35-70 °C Precisión $\pm 2\%$ Resolución 0.1°C Tiempo de respuesta 0.25 segundos
		<u>Humedad relativa</u> Rango 5-100% Precisión $\pm 2\%$ Resolución 1% Tiempo de respuesta 0.25 segundos

2.2.4 Desarrollo experimental

Las visitas en campo fueron realizadas en el periodo comprendido entre mayo y agosto de 2019 periodo de sequía con algunas precipitaciones aisladas, según las características climatológicas de Colombia. Para la toma de datos, se empleó el método de subdivisión por puntos o muestreo sistemático, donde se toma el área del galpón con sus dimensiones (largo x ancho) en metros, y se divide en cuadrículas (3 - 4 espacios a lo ancho y 5 - 7 espacios a lo largo dependiendo del tamaño del módulo), y en cada una, se ubica un punto de medida, con la finalidad de tomar muestras representativas en toda el área de la instalación (ver figura 2-1). En total, fueron establecidos 18 puntos por cada tipología.

Figura 2-1 Distribución de puntos de toma de muestras en las instalaciones.



El rango de medición se estableció para un tiempo de 12 horas con tres repeticiones, de 6:00 am a 6:00 pm, con intervalos de medición de cada tres horas, buscando un muestreo durante todo el día en el cual se presenta la mayor variabilidad térmica, los picos más grandes de altas temperaturas y de bajas temperaturas. Las tomas de datos fueron dadas a las 6:00 am, 9:00 am, 12:00 m, 3:00 pm, 6:00 pm. Los datos recolectados en cada matriz de las 10 tipologías fueron temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) y temperatura de globo negro ($^{\circ}\text{C}$).

Las diferentes tipologías fueron clasificadas por piso térmico como se muestra en la tabla 2-3, donde el 70% de las granjas se encuentra en municipios clasificados como piso térmico frío.

Tabla 2-3 Clasificación de pisos térmicos y distribución de las granjas del departamento de Antioquia

Piso térmico	Rango de elevación	Distribución porcentual de granjas en Antioquia	Tipologías
Cálido	0 - 900	3,1%	6, 10
Templado	900 - 1900	26,4%	2, 3, 5, 7, 9
Frío	1900 - 2800	70,5%	1, 4, 8
Muy frío	2800 - 3700	-	-
Extremadamente frío	3700 - 4700	-	-
Nival	> 4700	-	-

Fuente: (Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2005)(Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2016)

2.2.5 Índices de confort térmico

Se estimaron los valores de confort térmico mediante dos ecuaciones: índice de temperatura y humedad (THI) descrito en la ecuación 1 (Machado et al., 2016) e índices de humedad y temperatura de globo negro (BGHI) descrito en la ecuación 2 (Pezzopane et al., 2019)(de Oliveira Júnior et al., 2018). Para ambos índices, los valores son adimensionales. Estos índices permiten evaluar el confort térmico dentro de las instalaciones porcinas y caracterizar el ambiente al cual están sometidos los animales, para analizar si son favorables o no esas condiciones de confort para su desempeño productivo.

$$THI = (0.8 * Ta) + RH \left[\frac{Ta - 14.3}{100} \right] + 46.3 \quad (1)$$

$$THI = Tbd + 0.36 tdp + 41.2$$

Donde:

Ta: Temperatura del aire (°C);

RH: Humedad relativa (%)

$$BGHI = tbg + 0.36 tdp - 41.5 \quad (2)$$

Donde:

tbg: Temperatura de globo negro (°C)

tdp: temperatura de punto de rocío (°C)

Los valores de referencia adoptados por diversos autores para determinar la condición de confort, desconfort o crítico se enuncian en las tablas 2-4 y 2-5 (de Oliveira Júnior et al., 2018). Al igual que los índices, son establecidos valores de referencia para la temperatura y humedad relativa los cuales son recomendados para evitar que el cerdo se encuentre en una condición de estrés en sus diferentes etapas fisiológicas (Mayorga et al., 2019).

Tabla 2-4 Límites de confort térmico para cerdos (de Oliveira Júnior et al., 2018)

BGHI	
Confort térmico	BGHI < 72
Disconfort térmico	72 ≤ BGHI < 81.10
Estrés térmico	BGHI ≥ 81.10
THI	
Confort térmico	THI ≤ 74
Alerta	75 ≤ THI < 79
Peligroso	79 ≤ THI < 84
Emergencia	THI ≥ 84

Tabla 2-5 Zona de termo-neutralidad porcina en las diferentes etapas de producción. (Rodrigues et al., 2010)

Categoría	T ideal (°C) max-min	T crítica (°C)	Humedad relativa optima (%)
		Max.	
30 a 60 kg	18 – 16	27	50 – 70
60 a 100 kg	18 - 12	27	50 - 70

2.2.6 Análisis estadístico

La información recolectada fue sometida a un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la posible relación entre los valores de los índices THI, BGHI, temperatura, humedad relativa, y los pisos térmicos identificados para cada tipología constructiva, mediante el software estadístico R. Las medias se compararon utilizando la prueba Tukey con un nivel de significancia de $p < 0,05$ para todos los casos. Adicionalmente, se analiza la información mediante estadística descriptiva y mapas de isotermas mediante el software Surfer 14, para determinar el efecto de las anteriores variables a diferentes horas del día para cada granja o tipología constructiva.

2.3 Resultados y discusión

En la Tabla 2-6 se presentan los valores medios de temperatura Humedad relativa y de los índices THI y BGHI para cada tipología constructiva. Se puede observar que las 3 tipologías clasificadas en piso térmico frío (1, 4 y 8) se encuentran los mejores parámetros de confort, y aunque los resultados de temperatura están por encima de los rangos óptimos de confort para animales entre los 60 y 100 kg, lo cual es propio de la etapa de ceba, se encuentra por debajo de la temperatura crítica de 27°C. los indicadores THI y BGHI también mostraron resultados muy favorables para el bienestar de los animales al obtener resultados dentro de la zona de confort, en cuanto a la humedad relativa se evidencia que la tipología 1 es la que tiene la humedad más alta, entre las 10 granjas estudiadas, resultado que esta por fuera del rango óptimo determinado en la tabla 2-5. Se destaca que no existen diferencias significativas entre las tipologías pertenecientes a este piso térmico para los resultados de los índices THI y BGHI.

Para el piso térmico templado las tipologías (2, 3, 5, 7, 9 y 10) se encontraron únicamente dos (2 y 3) por debajo del valor crítico de temperatura, en contraste con la HR donde se encontró que estas mismas son las únicas por fuera o en el límite. En cuanto a los índices de confort térmico se evidencia que solamente una tipología (3) se encuentra dentro del rango de ambos índices de confort térmico lo cual puede estar explicado por la baja temperatura, y humedad dentro del rango óptimo, las demás granjas se encuentran en alerta para el índice THI y disconfort térmico para BGHI. No se evidencian diferencias

significativas entre las tipologías pertenecientes a este piso térmico para los resultados de los índices THI y BGHI.

Para el piso térmico cálido es posible evidenciar que la tipología que lo compone (6) presenta patrones adversos en todas las variables excepto humedad donde se encuentra dentro del rango óptimo de acuerdo a la tabla 2-5. Los valores de THI se encuentran entre las categorías de alerta y peligroso y para BGHI persisten en discomfort térmico al igual que el piso térmico templado.

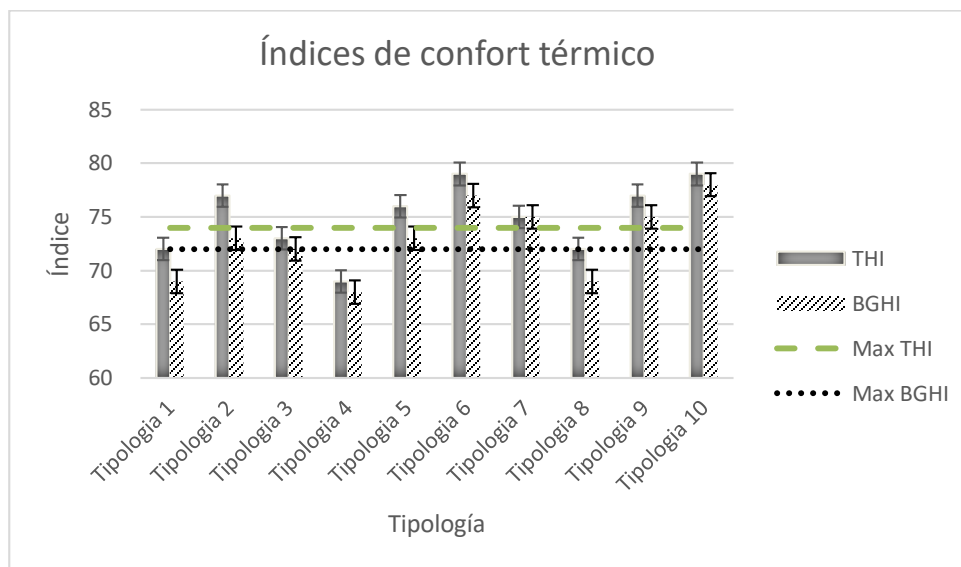
Tabla 2-6 ANOVA de Temperatura, Humedad Relativa, Índices THI y BGHI para diferentes tipologías constructivas.

Piso térmico (msnm)	Tipologías	msnm	T(°C)	HR(%)	THI	BGHI
Cálido	6	816	29.76 ± 2.52 ^a	61 ± 8 ^{cd}	79 ± 2 ^a	77 ± 4 ^{ab}
	10	1112	30.35 ± 4.22 ^a	57 ± 10 ^a	79 ± 4 ^a	78 ± 5 ^a
Templado	2	1179	26.57 ± 2.35 ^{ab}	72 ± 3 ^{ab}	77 ± 3 ^{ab}	73 ± 3 ^{bcd}
	3	1481	24.58 ± 1.52 ^{bc}	70 ± 3 ^{abc}	73 ± 2 ^{bc}	72 ± 3 ^{cde}
	5	1504	27.32 ± 2.72 ^{ab}	61 ± 3 ^{cd}	76 ± 3 ^{ab}	73 ± 3 ^{bcd}
	7	1732	27.07 ± 4.57 ^{ab}	62 ± 8 ^{bcd}	75 ± 6 ^{ab}	75 ± 6 ^{abc}
	9	1408	27.77 ± 4.73 ^{ab}	62 ± 10 ^{bcd}	77 ± 5 ^{ab}	75 ± 6 ^{abc}
Frío	1	2174	23.92 ± 2.06 ^{bc}	76 ± 8 ^a	72 ± 3 ^{bc}	69 ± 2 ^{de}
	4	2202	21.64 ± 2.31 ^c	68 ± 5 ^{abc}	69 ± 3 ^c	68 ± 2 ^e
	8	2236	24.45 ± 2.44 ^{bc}	63 ± 7 ^{bcd}	72 ± 3 ^{bc}	69 ± 3 ^{de}

De acuerdo con los resultados de la tabla 2-6 y la Figura 2-2, se puede definir que la variable más crítica para los índices es la temperatura, la cual determina que la mayoría de tipologías se encuentren por fuera del rango de confort, donde se puede evidenciar que para los índices BGHI y THI solo 4 tipologías se encuentran en zona de confort, tres de las

cuales pertenecen a piso térmico frío (1,4 y 8) y una a templado (3) con su valor BGHI en el límite máximo 72 ± 3 . En la figura 2 se alcanza a evidenciar que entre los índices las tipologías 1, 2, 5 y 8 tienen diferencias significativas, mientras que las 3, 4, 6, 7, 9 y 10 arrojan resultados muy parecidos resaltando a la tipología 7 con valores exactamente iguales.

Figura 2-2 Índices de confort térmico por tipología



Para realizar un comparativo teniendo en cuenta únicamente el piso térmico se calcularon los valores medios de temperatura, HR, THI and BGHI y se presentan en la Tabla 2-7 agrupados por pisos térmicos. Se observa que la temperatura promedio a nivel de las tipologías ubicadas en clima frío, fue de 23.34°C el cual está por debajo de la temperatura crítica tal como se enuncia en la tabla 2-6 y tiene diferencia significativa respecto a los demás pisos térmicos. Entre los climas cálido y templado (29.78 y 27.28°C respectivamente) no se evidencian diferencias significativas y en los dos casos alcanza valores promedios por encima de la temperatura crítica de 27°C lo cual se considera como un factor desencadenante para propiciar el estrés térmico en los animales. Los valores de HR, por el contrario, se mantuvieron dentro del rango sin presentar diferencias significativas entre los tres climas (Frío 69 %, Templado 64% y Cálido 61%) (Tabla 2-7).

Los resultados del índice THI se mantuvieron dentro de los rangos ideales de confort térmico para el piso térmico frío con un valor de 71.06 ± 3.30 arrojando diferencia

significativa con los otros pisos térmicos y mostrando que los animales de las tipologías 1, 4 y 8 se encontraban dentro del rango de confort térmico. Por el contrario, los pisos térmicos templado y cálido no presentaron diferencias entre ellos y arrojaron valores de THI que los ubican en los rangos de alerta y peligroso con valores de 76.16 ± 4.27 y 79.20 ± 2.48 respectivamente.

Para el índice BGHI se evidenciaron diferencias significativas entre los tres pisos térmicos, los resultados validan que las producciones que se encuentran localizadas en piso térmico frío son las únicas que tienen a sus animales en condiciones de confort térmico debido a que su resultado (69.06 ± 2.21) es menor a 72. Los valores de los pisos térmicos templado y cálido (74.56 ± 4.70 y 77.60 ± 3.50) se encuentran en el rango de desconfort térmico de acuerdo a los valores de referencia de la tabla 2-5.

Tabla 2-7 Análisis de varianza de las variables temperatura, humedad relativa e índices THI y BGHI para diferentes pisos térmicos.

Piso térmico (msnm)	T(°C)	HR(%)	THI	BGHI
Cálido (0 - 900)	29.76 ± 2.52^a	61 ± 8^a	79.20 ± 2^a	77 ± 4^a
Templado (901 – 1900)	27.28 ± 3.68^a	64 ± 8^a	76.16 ± 4.27^a	74.56 ± 4.70^b
Frío (1901 – 2800)	23.34 ± 2.45^b	69 ± 8^a	71.06 ± 3.30^b	69.06 ± 2.21^c

La Tabla 2-8 muestra los Mapas de Isothermas para el índice THI y BGHI en las 10 tipologías. Se puede observar la mayor uniformidad en la distribución de Índices en toda el área de las instalaciones que se encontraron en las tipologías 4, 6, 2, 5 y 8, lo que podría explicar el comportamiento del índice térmico al mostrar que la posición de entrada de aire en función de la ventilación natural es adecuada.

Tabla 2-8 Mapa de isothermas para los índices THI y BGHI, en las diferentes tipologías constructivas.

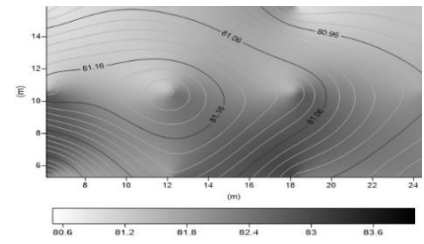
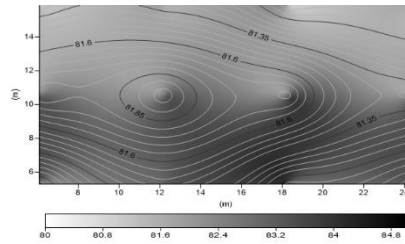
**Piso térmico
(msnm)**

**Cálido
(0 - 1000)**

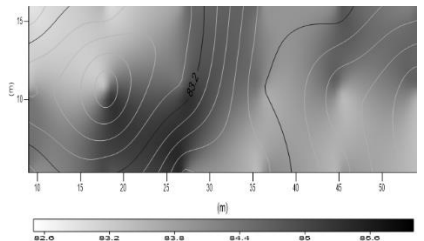
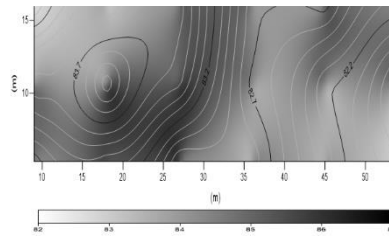
THI

BGHI

6

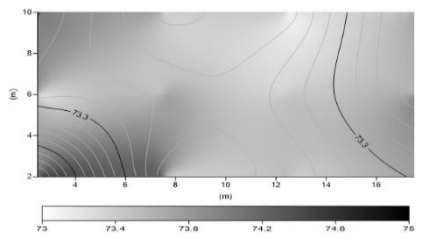
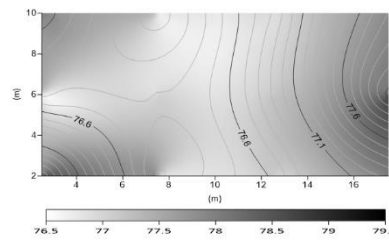


10

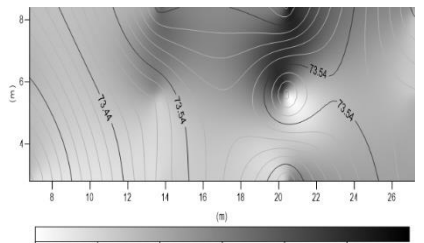
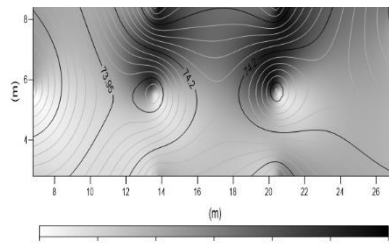


**Templado
(1000 - 2000)**

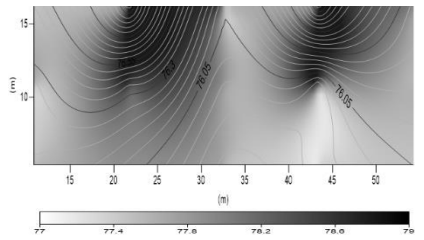
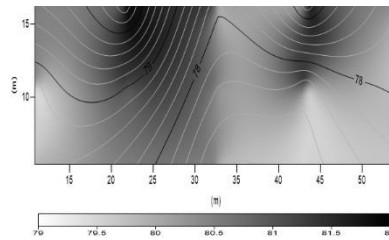
2



3



5



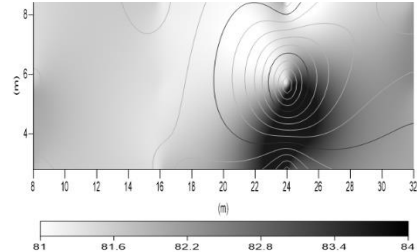
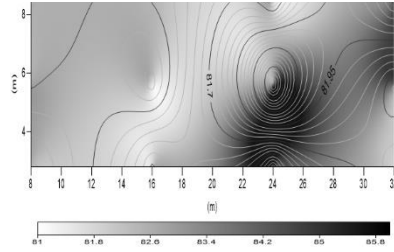
Piso térmico (msnm)

Tipologías

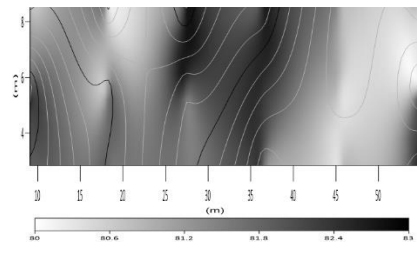
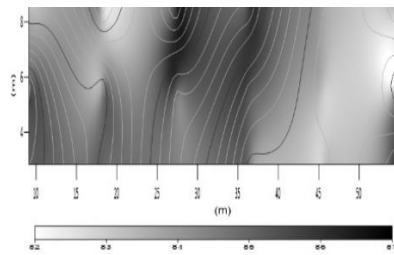
THI

BGHI

7

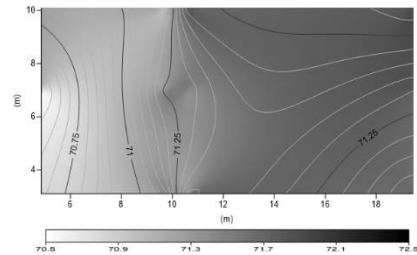
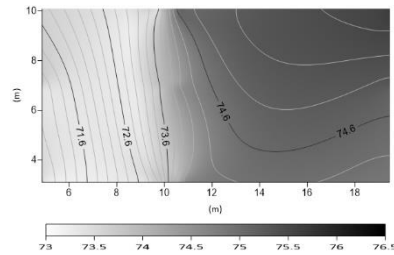


9

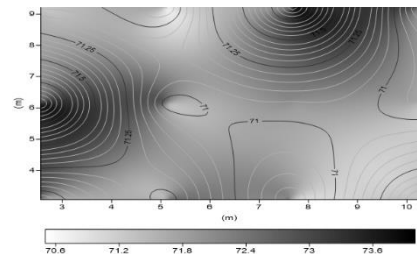
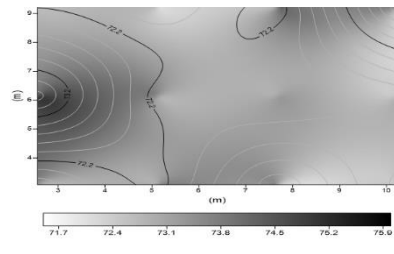


Frío (2000 - 3000)

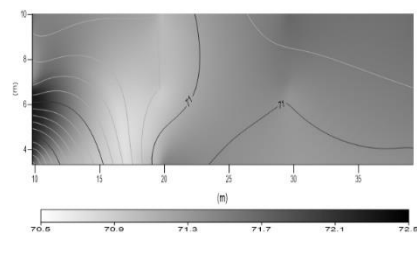
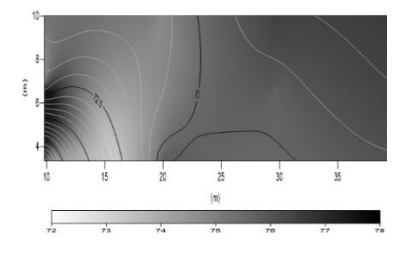
1



4



8



2.4 Conclusiones

Para el departamento de Antioquia, donde se desarrolla la mayor proporción de la producción porcícola del país y predomina en las tipologías constructivas la ventilación natural, el piso térmico más adecuado para garantizar el confort de los animales es el frío con alturas sobre el nivel mar entre los 1900 y 2800 metros, rango en donde actualmente se encuentra el 70% de la producción del departamento. Las tipologías estudiadas clasificadas dentro de los pisos térmicos templado y cálido estuvieron por fuera de los rangos de confort a excepción de la tipología 3 que mostro generar confort térmico a los animales debido a un bajo valor de temperatura, las demás (60%) arrojaron valores críticos para esta variable, alerta y peligro para el índice THI y discomfort térmico para BGHI. Se puede concluir que el 60 % de las granjas estudiadas posiblemente tengan un potencial para mejorar la productividad y competitividad si se realizan modificaciones a las instalaciones que permitan mejorar las condiciones de confort térmico en los animales.

AGRADECIMIENTOS. Este informe es el resultado de una colaboración entre la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia y el Laboratorio de Bioclimática Aplicada a la Agroindustria

2.5 Referencias

- Ameen, R. F. M., & Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process. *Sustainable Cities and Society*, 44(October 2018), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.020>
- Bjerg, B., Brandt, P., Sørensen, K., Pedersen, P., & Zhang, G. (2019). Review of methods to mitigate heat stress among sows. *2019 ASABE Annual International Meeting, June*. <https://doi.org/10.13031/aim.201900741>
- Bjerg, B., Demeyer, P., Hoyaux, J., Didara, M., Grönroos, J., Hassouna, M., Amon, B., Bartzanas, T., Sándor, R., Fogarty, M., Klas, S., Schiavon, S., Juskiene, V., Radeski, M., Attard, G., Aarnink, A., Gülzari, Ş. Ö., Kuczyński, T., Figueiro, D., ... Norton, T. (2019). Review of legal requirements on ammonia and greenhouse gases emissions from animal production buildings in european countries. *2019 ASABE Annual International Meeting, June*, 23. <https://doi.org/10.13031/aim.201901070>
- Briukhanov, A., Subbotin, I., Uvarov, R., & Vasilev, E. (2017). Method of designing of manure utilization technology. *Agronomy Research*, 15(3), 658–663.
- Broucek, J. (2018). *Nitrous Oxide Release from Poultry and Pig Housing*. 27(2), 467–479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75871>

- Castrillón, N., González, V., Osorio, J. A., Montoya, A. P., & Correa, G. (2020). Assessment of the methane emission for different typologies of fattening swine facilities in the department of antioquia Colombia. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 2), 1189–1202. <https://doi.org/10.15159/AR.20.108>
- Cecchin, D., Pereira, C. R., Campos, A. T., Ferraz, P. F. P., Amaral, P. I. S., Sousa, F. A., Hüther, C. M., & Cruz, V. M. F. (2019). Behavior of swine hosted in facilities with different construction typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 7(1), 6–10. <https://doi.org/10.31893/2318-1265jabb.v7n1p6-10>
- Cecchin, D., Campos, A., Cruz, V., Sousa, F., Amaral, P., & Yanagi Junior, T. (2017). Air quality in swine growing and finishing facilities with different building typologies TT - Qualidade do ar em instalações para suínos em crescimento e terminação com diferentes tipologias construtivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 339–343. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p339-343>
- Cecchin, Daiane, Da Cruz, V. F., Campos, A. T., Sousa, F. A., Amaral, P. I. S., Da Silva Ramos Freitas, L. C., & Andrade, R. R. (2017). Thermal environment in growing and finishing pig facilities of different building typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 5(4), 118–123. <https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v5n4p118-123>
- CIGR. (2006). *ANIMAL HOUSING IN HOT CLIMATES: A multidisciplinary view* (I. de A. Nääs & D. J. Moura (eds.)). CIGR.
- de Oliveira Júnior, A. J., de Souza, S. R. L., da Cruz, V. F., Vicentin, T. A., & Glavina, A. S. G. (2018). Development of an android APP to calculate thermal comfort indexes on animals and people. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(October 2017), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.014>
- de Vries, M., & de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). *3rd National Agricultural Survey, Colombia*.
- Dominica, I., Suharjito, Noviantri, V., & Utama, D. N. (2018). Thermal comfort modelling based on house's architecture using ghost point quadratic explicit method. *International Review of Civil Engineering*, 9(4), 141–147. <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.14417>
- Ferrari, S., Costa, A., & Guarino, M. (2013). Heat stress assessment by swine related vocalizations. *Livestock Science*, 151(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.10.013>
- Gabriel, D., Allen, A., Bastviken, D., Conrad, R., Gudasz, C., St-Pierre, A., Thanh-Duc, N., & Del Giorgio, P. A. (2014). Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507(7493), 488–491. <https://doi.org/10.1038/nature13164>
- Gerber, P. ., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Facing climate change through livestock*.
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>
- Gobernación de Antioquia. (2014). *Anuario estadístico del sector agropecuario en el departamento de Antioquia*.

- Hansen, R., & Bjerg, B. (2018). *Natural ventilation's ability to prevent high indoor temperatures*. *m*(April).
- Huerta_Crispin, R., & Gas, J. (2012). Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos. In *Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). *National Inventory of Greenhouse Gases (GHG) Colombia 2012*.
- Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2005). Atlas climatológico de Colombia. *Atlas Climatológico de Colombia*, 219. <http://www.ideam.gov.co/>
- Jackson, P., Guy, J. H., Sturm, B., Bull, S., & Edwards, S. A. (2018). An innovative concept building design incorporating passive technology to improve resource efficiency and welfare of finishing pigs. *Biosystems Engineering*, 174, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.008>
- Lenerts, A., Popluga, D., & Naglis-Liepa, K. (2019). Benchmarking the GHG emissions intensities of crop and livestock-derived agricultural commodities produced in Latvia. *Agronomy Research*, 17(5), 1942–1952. <https://doi.org/10.15159/AR.19.148>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. ., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016a). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. M., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016b). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- 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>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2019). National Agroclimatic Report May 2019. In *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)* (Vol. 53).
- Monteny, G. J., Bannink, A., & Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(2–3), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.015>
- Myer, R., & Bucklin, R. (2012). Influence of Hot-Humid Environment on Growth Performance and Reproduction of Swine 1 Methods to Minimize Heat Stress. *University of Florida, IFAS Extension. AN 107*, 1–8.
- Nations Food and Agriculture - FAO. (2011). World Livestock 2011 - Livestock in food security World. In *FAO*. <https://doi.org/10.1080/00036841003742587>
- Noya, I., Villanueva-Rey, P., González-García, S., Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., & Moreira, M. T. (2017). Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4327–4338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.160>
- Noya, Isabel, Aldea, X., Gasol, C. M., González-García, S., Amores, M. J., Colón, J., Ponsá, S., Roman, I., Rubio, M. A., Casas, E., Moreira, M. T., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. *Journal of Environmental Management*, 171, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.039>
- OCDE/FAO. (2013). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.

-
- Osorio-Saraz, J. A., Ferreira-Tinoco, I. D. fatima, Gates, R. S., Oliveira-Rocha, K. S., Combatt-Caballero, E. M., & Campos-de-Sousa, F. (2014). Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. *Dyna*, 81(187), 137–143. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40806>
- Petersen, S. O., Olsen, A. B., Elsgaard, L., Triolo, J. M., & Sommer, S. G. (2016). Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. *PLoS ONE*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>
- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79(November 2018), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Philippe, F X., Laitat, M., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2012). Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.006>
- Philippe, F X., Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2013). Influence of permanent use of feeding stalls as living area on ammonia and greenhouse gas emissions for group-housed gestating sows kept on straw deep-litter. *Livestock Science*, 155(2–3), 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.005>
- Philippe, F X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Philippe, François Xavier, Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3–4), 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012>
- Pietrosemoli, S., & Tang, C. (2020). Animal welfare and production challenges associated with pasture pig systems: A review. *Agriculture (Switzerland)*, 10(6), 1–34. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060223>
- Porkcolombia, & PigCHAMP. (2015). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*. (p. 34).
- Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2013). Life Cycle Assessment of pork production: A data inventory for the case of Germany. *Livestock Science*, 157(2–3), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.001>
- Reimert, I., Rodenburg, T. B., Ursinus, W. W., Kemp, B., & Bolhuis, J. E. (2014). Selection based on indirect genetic effects for growth, environmental enrichment and coping style affect the immune status of pigs. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108700>
- Rhodes, T., Appleby, M., Chinn, K., Douglas, L., Firkins, L., Houpt, K., Irwin, C., McGlone, J., Dundberg, P., Tokach, L., & Wills, R. (2005). A comprehensive review of housing for pregnant sows Members - Task Force Report. *Javma*, 227(10), 1580–1590.
- Rodrigues, N. E. B., Zangeronimo, M. G., & Fialho, E. T. (2010). Suínos Sob Estresse Térmico. *Revista Eletrônica Nutritime*, 7(2), 1197–1211.
- Ross, J. W., Hale, B. J., Gabler, N. K., Rhoads, R. P., Keating, A. F., & Baumgard, L. H. (2015). Physiological consequences of heat stress in pigs. *Animal Production Science*, 55(11–12), 1381–1390. <https://doi.org/10.1071/AN15267>
- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., LeRoy Miller,

- H. jr, & Chen, Z. (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis. In *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York* (Issues 1–4). <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6>
- Sedorovich, D. M., Rotz, A., & Richard, T. L. (2007). Greenhouse gas emissions from dairy farms. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers*, 9, 14. <https://doi.org/10.13031/2013.23112>
- Seibert, L., & Norwood, F. B. (2011). Production costs and animal welfare for four stylized hog production systems. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/10888705.2011.527596>
- Sharpe, R. ., Harper, L. ., & Simmons, J. . (2001). Methane emission from swine houses in North Carolina. *Chemosphere Global Change Science*, 3, 1–6.
- Sousa, F. C., Tinôco, I. F. F., Barbari, M., Baptista, F., Souza, C. F., Saraz, A. O., Coelho, D. J. R., & Silva, A. L. (2018). Diagnosis of air quality in broilers production facilities in hot climates. *Agronomy Research*, 16(2), 582–592. <https://doi.org/10.15159/AR.18.070>
- Steinfeld, H., & Gerber, P. (2010). Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18237–18238. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107>
- USDA. (2011). *Department of agriculture national agricultural statistics service agricultural - Agricultural Statistics 2010*. 1–9.
- XIONG, Y., MENG, Q. shi, GAO, J., TANG, X. fang, & ZHANG, H. fu. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0)

3. Capítulo 3

Artículo publicado en la revista *Agronomy Research* 18(S2), 1189 1202, 2020
<https://doi.org/10.15159/AR.20.108>

Evaluación de la emisión de metano para diferentes tipologías de instalaciones de engorde porcino en el departamento de Antioquia – Colombia

N. Castrillón^{2,3*}, V. González^{1,3}, J.A. Osorio¹, A.P Montoya¹ and G. Correa¹

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrarias, Carrera 65 #59A-110, Código postal CO050034 Medellín, Colombia

²Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Minas, AV 80 #65-223, Código postal CO050034 Medellín, Colombia

³Grupo de Investigación en Biodiversidad y Genética Molecular (BIOGEM), Departamento de Producción Animal, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Carrera 65 No. 59 A-110, CO050034 Código, Colombia

*Correspondence: ncastrillon@unal.edu.co

Resumen. El crecimiento explosivo de la producción porcina a altas densidades en explotaciones confinadas en todo el mundo ha generado preocupación en muchos investigadores sobre el impacto ambiental, la salud y la productividad ganadera y la producción de biogases asociados a este tipo de producción a gran escala. El objetivo de este trabajo fue estudiar la concentración y las emisiones de gas metano de diez tipologías constructivas diferentes. Las instalaciones se ubicaron en el departamento de Antioquia - Colombia, entre 800-2300 metros sobre el nivel del mar, todas las tipologías trabajaban con ventilación natural como estrategia de refrigeración y fueron utilizadas para cerdos en etapa de ceba. Las medidas de metano se tomaron con sensores ubicados en puntos intermedios de las áreas de entrada y salida de ventilación. Se analizó el comportamiento de la concentración y emisión de metano de las instalaciones junto con la correlación y evolución temporal de las variables climáticas, índices de confort y tipologías constructivas. La información se analizó mediante estadística descriptiva, análisis de varianza (ANOVA) y análisis de componentes principales (PCA). Se encontró un promedio de tasa de Emisión de CH₄ (ER) por instalación (Kg año⁻¹) de 607.9, potencial de calentamiento global (GWP) por instalación (Kg año⁻¹) de 15197.42 y correlaciones significativas entre ER, frecuencia

de limpieza (CF), unidad animal (AU), flujo de aire (Q), densidad animal (DA) y humedad relativa (HR). Esta es la primera investigación reportada en Colombia, que será importante para crear algunas políticas gubernamentales.

Abstract. The explosive growth of swine production at high stocking densities in confined farming worldwide, has raised concerns in many researchers regarding the environmental impact, health and livestock productivity and the production of associated biogases in this type of large-scale farms. The aim of this paper was to study the methane gas concentration and emissions of ten different typologies of swine production installations. The facilities were in the department of Antioquia - Colombia, they were located between 800 - 2300 masl of heights, they mainly employed natural ventilation as refrigeration strategy, and they were used for pigs in fattening stage. Sensors were located at intermediate points of the ventilation inlet and outlet areas. The behaviour of methane concentration and emission of the facilities were analysed along with the correlation and temporal evolution of climatic variables, comfort indices and construction typologies. The information was analysed using descriptive statistics, analysis of variance (ANOVA) and principal component analysis (PCA). Were found an average of CH₄ Emission Rate (ER) per facility (Kg year⁻¹) of 607.9, Global Warming Potential (GWP) per facility (Kg year⁻¹) of 15197.42 and significant correlations between ER and cleaning frequency (CF), animal unit (AU), air flow (Q), animal density (AD) and relative humidity (RH) were evidenced. This is the first research reported in Colombia, that will be important to create some governmental policies.

Palabras clave: Tipología constructiva, emisiones de metano, ventilación natural, gases de efecto invernadero, producción porcina.

3.1 Introducción

El sector Agrícola es considerado como el mayor usuario y administrador de los recursos naturales, y como tal, se considera que tiene un alto impacto en el medio ambiente debido a su capacidad para reducir las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Lenerts et al., 2019). Se estima que el 70% del potencial de mitigación del sector se ubica en países en desarrollo (Gitz et al., 2016). Según la tercera declaración nacional de cambio climático de Colombia, actividades como la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra aportan

un aproximado del 43% de los GEI (70 Mt CO₂eq), residuos 8%, procesos industriales y uso de productos 5% y energía 44% (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015). La producción de ganado en confinamiento optimiza el uso de la tierra, sin embargo, aumenta el volumen de residuo que se producen y transforman en biogases (Briukhanov et al., 2017). Estos biogases se agrupan según su incidencia en el fenómeno de cambio climático y la salud humana (Petersen et al., 2016). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), se estima que el sector ganadero aporta 6.2 GT of CO₂ equivalente (CO₂eq) por año, lo que representa el 14,5% de las emisiones inducidas por el hombre, del total de las emisiones generadas por el sector ganadero, la producción porcina es responsable de 0,7 GT de CO₂eq, lo que suma hasta el 9% (Gerber et al., 2013). En el sector ganadero, la producción porcina ocupa el tercer lugar seguido por la carne vacuna y los lácteos, tendencia que sigue el modelo europeo donde la producción porcina representa el 26% de las emisiones de GEI del sector (Isabel Noya et al., 2016). De acuerdo con de Vries & de Boer, (2010) la producción porcina, tiene mayor potencial de afectar el cambio climático que las producciones de lácteos, y considera la porcicultura como el segundo lugar comparándolo con bovinos, aves, lácteos y huevos, con unos rangos de Emisión de 3.9 – 10 kg CO₂eq por kilogramo de cerdo producido, igualmente I. Noya et al., (2017) considera que los productos porcinos son el segundo mayor generador de GEI entre los productos cárnicos. Esto se ha hecho evidente en los estudios sobre ciclos de vida desarrollados por Reckmann et al., (2013), I. Noya et al., (2017) and I. Noya et al., (2016) en el cual la producción de CO₂eq por kilogramo de carne producida en Alemania está entre los rangos de 3,22 - 3,42 y de 2,30 - 3,30 respectivamente. Los animales monogástricos como aves y cerdos han tenido un aumento considerable en el consumo con un crecimiento anual del 2,8% (Steinfeld & Gerber, 2010), siendo el producto cárnico más consumido en las regiones europeas (I. Noya et al., 2016) y en general a nivel mundial, con una proyección de crecimiento del 40% (Nations Food and Agriculture - FAO, 2011), lo que representa un gran desafío.

De acuerdo a de Vries & de Boer, (2010) Los animales monogástricos tienen un mayor potencial de calentamiento global (GWP) generalmente determinado por N₂O y CH₄ emisiones debidas a la gestión del estiércol. N₂O y CH₄ son contribuyentes importantes debido a que su GWP en el lapso de un siglo es 310 y 25 veces más alto que CO₂,

respectivamente (Salomon et al., 2007). La generación de GEI según la cadena de producción es la siguiente: 1) Producción de alimentos para animales con 48% de las emisiones, 2) Manejo y almacenamiento de estiércol con 27,4%, la mayor parte como CH₄ (19.2%), 3) Transporte de ganado y piensos con un aporte moderado del 5,7% y finalmente 4) Consumo energético agropecuario con apenas el 3,5% del total de emisiones (Gerber et al., 2013). Los experimentos realizados con cerdos de destete y engorde demostraron que las emisiones de CO₂ pueden diferir en función de la tipología constructiva, mientras que características como la dieta, la eficiencia animal y las condiciones climáticas permanecieron iguales (François Xavier Philippe et al., 2011). Para Monteny et al., (2006) en animales monogástricos, como los cerdos, el CH₄ se produce mayoritariamente en el intestino grueso y el almacenamiento en tanque estercolero, sin embargo, el estiércol almacenado en fosas inundada y pisos de corrales también son fuentes relevantes bajo las siguientes condiciones: 1) La temperatura y la tasa de ventilación aumentan el trabajo de bacterias metanogénicas que transforman acetato, CO₂ y H₂ en metano en un ambiente termofílico, 2) Tiempo de almacenamiento, 3) pH óptimo cercano a neutro (François Xavier et al., 2011), 4) altos niveles de materia orgánica degradable, y 5) altos niveles de humedad que facilitan la metanogénesis tanto en la fase líquida como sólida del estiércol. Igualmente F X Philippe & Nicks, (2015) establece que las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O aportan 81, 17 y 2% del total de emisiones en los alojamientos, lo que representa 3.87-0.83-0.17 kg of CO₂ eq por canal respectivamente. El valor de CH₄ generado en el alojamiento por un cerdo en etapa de engorde es 16.7g CH₄ por día, etapa que representa el 70% de las emisiones totales, mientras que los períodos de gestación, lactancia y destete contribuyen aproximadamente con el 10% de las emisiones totales.

Actualmente existen regulaciones para gases tóxicos como el amoníaco, sin embargo, no fue posible encontrar evidencia de una regulación que pueda limitar las emisiones de GEI de los alojamientos de los animales. Además, la legislación existente se limita a solicitar informes, como es el caso de la Unión Europea, donde se solicita a los productores que reporten emisiones anuales de CH₄ superiores a 100.000 kg e Israel cuando superen los 10.000 kg al año. (Bjerg, Demeyer, et al., 2019). Hay pocos estudios en todo el mundo para medir las concentraciones de CH₄ en la población porcina en climas tropicales, en los que el alojamiento de los animales funciona con ventilación natural la mayor parte del año, los estudios que se han realizado se centran principalmente en las tipologías constructivas en pozos inundados como se muestra en el estudio de Petersen et al., (2016) donde se

evaluaron 7 tipos de alojamiento en Dinamarca y se evidencio que las estimaciones actuales de las emisiones de CH₄ del manejo del estiércol porcino y bovino se ubican en 0.032-0.015 kg CH₄ respectivamente, lo que indica que los pozos de estiércol líquido en confinamientos de animales son una fuente importante. Otro análisis frecuente es la evaluación de los tipos de suelo en los alojamiento de animales y su generación de biogás, tal es el caso de Bélgica, donde se evaluó la producción de cerdos de engorde en sistema de cama profunda y el engorde en suelo enrejillados con cerdos de engorde (F X. Philippe et al., 2012). Un estudio más desarrollado en Carolina del Norte por Sharpe et al., (2001) en granjas de ventilación controlada y fosas inundadas mostró que durante el período de medición de invierno, las emisiones de CH₄ tienen en promedio 6.9 g CH₄ animal⁻¹ d⁻¹ y durante los períodos de medición de verano, los flujos de CH₄ fueron mucho mayores y promediaron 33g CH₄ animal⁻¹ d⁻¹. Se desarrollaron varios estudios para emisiones de NH₃ en América Latina, uno de ellos en Antioquia Colombia en corrales de gallinas (Osorio-Saraz et al., 2014), mientras que en Brasil la atención se centró en instalaciones de producción porcina (D Cecchin et al., 2017), ninguno de estos informes se realizó para estudios de CH₄. En este contexto, este trabajo tuvo como objetivo estudiar las concentraciones y emisiones de CH₄ en las instalaciones de engorde de cerdos, donde es difícil separar las emisiones de GEI provenientes directamente de los animales de las generadas por el estiércol. Como resultado, las emisiones de los animales y su alojamiento se agrupan en una categoría: Emisiones del alojamiento (emisiones totales de ganado y estiércol dentro de las instalaciones) (Sedorovich et al., 2007). Este trabajo es uno de los primeros en realizar este enfoque en el país.

3.2 Materiales y métodos

Este estudio se desarrolló en Antioquia, Colombia, donde se concentra la mayor parte de la producción porcina del país (30,7%), solo en el ganado de engorde el porcentaje es de 35,5%, lo que equivale a unos 1.394.769 animales, esto de acuerdo con la última encuesta realizada por la Departamento Administrativo Nacional de Estadística (Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), 2016). El diseño de la investigación tiene un enfoque observacional, dado que ninguna variable se vio afectada en las unidades estudiadas. Se evaluaron un total de 10 granjas comerciales que producen cerdos en etapa

de ceba en diferentes localidades y variables de altitud de Antioquia. Todas las tipologías constructivas observadas contaron con ventilación natural y sus características individuales están representadas en la tabla 3-1.

3.2.1 Descripción del clima:

Dada la variada topografía de Antioquia, donde la mayoría de las variantes climáticas están representadas, se trabajó con granjas entre 810 y 2236 metros sobre el nivel del mar, lo cual ofrece muestras térmicas de climas fríos, templados y cálidos según la clasificación climática de Caldas-Lang. La Tabla 3-1 muestra el detalle de la ubicación de cada tipología.

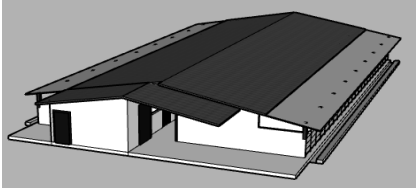
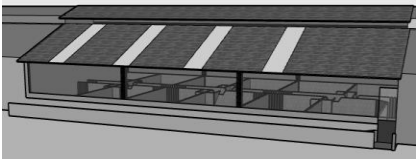
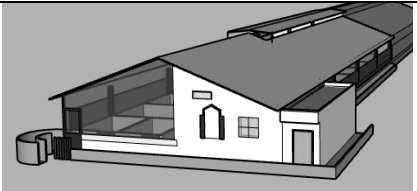

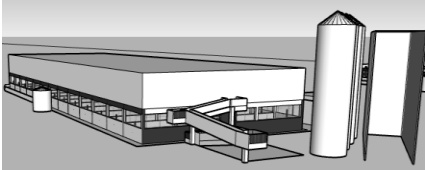
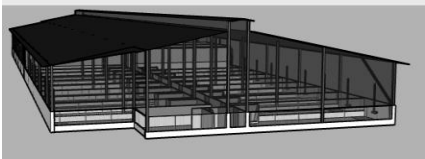
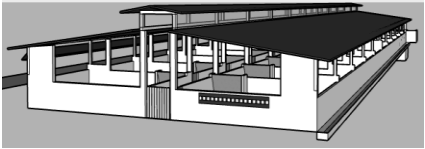
3.2.2 Gestión técnica de las fincas:

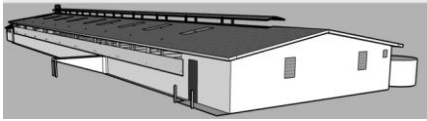

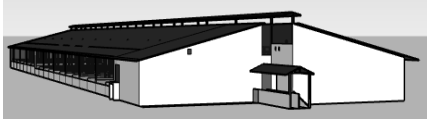
Las unidades de estudio corresponden a granjas comerciales de engorde porcino, estos animales son un cruce entre las razas Landrace y Yorkshire, genéticamente conocidas como F1 (Primera generación de un cruce de razas puras). Todas las fincas observadas tienen el mismo manejo nutricional de alimento balanceado compuesto por: 1) Fuentes energéticas como maíz, aceites, grasas y subproductos agrícolas, 2) Proteínas de origen vegetal, que incluye principalmente soja y harinas animales a base de pescado, carne, huesos y derivados lácteos, y 3) suplementos de vitaminas y minerales.

3.2.3 Características de las Instalaciones.

La ventilación de estas instalaciones se logra a través de ventanas y/o cortinas laterales para fincas en climas fríos, media pared para climas templados y fríos, sin pared para climas cálidos y 7 de ellas contaban con sobre techo, para los 10 alojamientos el piso fue de concreto liso. En la tabla 3-1 se presentan los valores medios de algunas variables y las características de cada tipología.

Tabla 3-1 Características de cada tipología.

Tipología 1	<p>Clasificación climática: Frío Altura sobre el nivel del mar: 2174 m Temperatura: 21,2 ° C Humedad relativa: 76% Unidades animales: 18.7 Frecuencia de limpieza: 0</p>	
Tipología 2	<p>Clasificación climática: templado Altura sobre el nivel del mar: 1179 m Temperatura: 27,8 ° C Humedad relativa: 67,8% Unidades animales: 31.0 Frecuencia de limpieza: 1</p>	
Tipología 3	<p>Clasificación climática: templado Altura sobre el nivel del mar: 1481 m Temperatura: 25,9 ° C Humedad relativa: 65,8% Unidades animales: 30.2 Frecuencia de limpieza: 1</p>	
Tipología 4	<p>Clasificación climática: Frío Altura sobre el nivel del mar: 2202 m Temperatura: 22,7 ° C Humedad relativa: 64,4% Unidades animales: 23,9 Frecuencia de limpieza: 2</p>	
Tipología 5	<p>Clasificación climática: templado Altura sobre el nivel del mar: 1504 m Temperatura: 26,0 ° C Humedad relativa: 63,0% Unidades animales: 137.8 Frecuencia de limpieza: 2</p>	
Tipología 6	<p>Clasificación climática: cálido Altura sobre el nivel del mar: 816 m Temperatura: 29,1 ° C Humedad relativa: 62,2% Unidades animales: 66.5 Frecuencia de limpieza: 2</p>	
Tipología 7	<p>Clasificación climática: templado Altura sobre el nivel del mar: 1732 m Temperatura: 25,0 ° C Humedad relativa: 64,3% Unidades animales: 73.8 Frecuencia de limpieza: 2</p>	

Tipología 8	Clasificación climática: Frío Altura sobre el nivel del mar: 2236 m Temperatura: 21,8 ° C Humedad relativa: 66,7% Unidades animales: 72.1 Frecuencia de limpieza: 1	
Tipología 9	Clasificación climática: templado Altura sobre el nivel del mar: 1408 m Temperatura: 26,2 ° C Humedad relativa: 62,2% Unidades animales: 49.5 Frecuencia de limpieza: 1	
Tipología 10	Clasificación climática: Calido Altura sobre el nivel del mar: 1112 m Temperatura: 28,4 ° C Humedad relativa: 60,6% Unidades animales: 164,9 Frecuencia de limpieza: 2	

* Frecuencia de limpieza = 0) Cuando el piso está completamente evacuado, 1) Diariamente y 2) Cada dos días.

Las diferentes tipologías fueron clasificadas por variaciones térmicas como se muestra en la tabla 3-2.

Tabla 3-2 Clasificación de tipología según Piso térmico

Piso térmico	Tipología
Cálido	6
Templado	2, 3, 5, 7, 9, 10
Frio	1, 4, 8

3.2.4 Plazo de las mediciones

El trabajo de campo para esta investigación se desarrolló durante los meses de mayo, junio y julio de 2019, el primer trimestre en el cual abril-mayo tuvo lluvias abundantes y frecuentes, con un valor superior a los 300 milímetros, según la información proporcionado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y el ministerio de agricultura de Colombia (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), 2019)

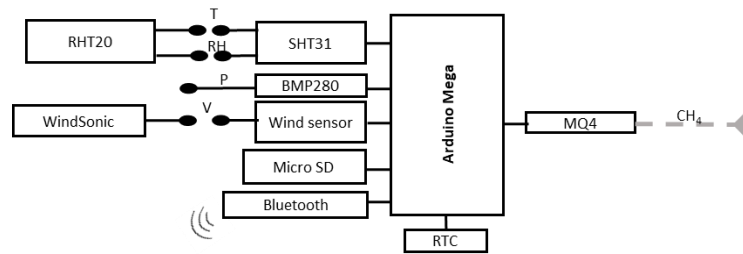
3.2.5 Características del equipo utilizado

Se desarrolló un sistema de medición de gas CH₄ de bajo costo (MGMS) hecho a medida para fines de monitoreo. los sensores empleados se detallan en la Tabla 3-3, se implementó un sistema de monitoreo Andruino, como se puede ver en la Fig. 1. Se emplearon sensores semiconductores de óxido metálico para medir el CH₄, junto con la temperatura del aire, la humedad relativa, la presión atmosférica y la velocidad del aire, los datos se guardaron cada 5 minutos en una tarjeta de memoria micro SD con fecha y hora. También se emplearon: Anemómetro direccional (rango 0-60 m/s, precisión $\pm 2\%$ @ 12 m/s, utilizado para estimar la dirección del viento predominante) e instrumento para el cálculo de los índices de confort térmico (HD 32.2) (temperatura de trabajo -5... 50 ° C, temperatura de almacenamiento -25... 65 ° C, humedad relativa de trabajo 0... 90% HR sin condensación; incertidumbre del instrumento ± 1 dígito a 20 ° C).

Tabla 3-3 Referencia, rango y precisión de sensores de bajo costo (LC).

Sensor	Referencia	Rango
Temperatura del aire	SHT31	-40 to 90 °C
Humedad relativa	SHT31	0 to 100%;
Velocidad del aire	Wind sensor Rev P	0 to 67 m s-1
Gas CH ₄	MQ4	100 to 10000 ppm
Presión	BMP280	300-1100hPa

Figura 3-1 Esquema de la configuración de las variables medidas: sensores independientes. Variables medidas: Temperatura (T), humedad relativa (RH), Velocidad del aire (V) y Presión atmosférica (P) y Metano (CH₄).



3.2.6 Ubicación de los dispositivos colectores y frecuencia de medición

La unidad de estudio fue el alojamiento de los animales. La recolección de datos se realizó de manera continua durante 24 horas en cada alojamiento, se instalaron 4 kits de sensores en el medio del área de ventilación, se determinaron la dirección predominante de los vientos, entradas y salidas de flujo de aire. La ubicación de cada una de las cajas de sensores se localizó de acuerdo con cada una de las tipologías constructivas evaluadas.

3.2.7 Determinación de factores de emisión y otras variables.

Las variables monitoreadas con los sensores fueron:

- Temperatura (T), = °C
- Humedad Relativa (RH)= %
- Presión atmosférica (P) = mbar
- Velocidad del viento (V) = m/h
- Concentración de CH₄ (C) = ppm
- Temperatura de globo negro (Tg)= °C
- Temperatura de rocío (Dp) = (°C)
- Área del kit de sensor de caja (BA) = 0.00456 m²

Las variables relevantes de cada tipología constructivas fueron:

- Metros sobre el nivel del mar (hasl)
- Clasificación climática (CC) = Caldas -Lang
- Número de animales por corral (AW) = kg
- Densidad de los animales por corral (AA)
- Área Total del Galpón (A) = m²
- Área efectiva de ventilación (EVA)= m² y %

- Frecuencia de lavado (CF) = 0 cuando se evacua totalmente la nave, 1 diario y 2 cada dos días.

Las ecuaciones para realizar los cálculos fueron:

a) Unidad animal (AU): Las emisiones en el alojamiento están representadas como kg AU⁻¹, donde AU representa 500kg de masa animal.

b) Densidad animal (AD):

$$AD = (AW * AA) / A \quad (1)$$

*Expresado en m²

c) Tasa de ventilación (Q):

$$Q = V * BA \quad (2)$$

*Expresado en m³h⁻¹

d) Factor K para convertir concentración de CH₄ ppm en kg m⁻³ en función de las siguientes variables

P= Presión

n= Moles del gas

V= volumen

T= Temperatura

R= Constante universal de los gases ideales

e) Tasa de emisión (ER):

$$ER = K Q (C_o - C_i) \quad (3)$$

Donde:

C_o = Salida de concentración de gas, ppm

C_i = Entrada de concentración de gas, ppm

* Expresado en kg año⁻¹

f) Potencial de calentamiento global (GWP):

$$E_{CO_2eq} = 25 E_{CH_4} \quad (4)$$

* Expresado en kg año⁻¹ por granja

* Teniendo en cuenta que GWP de CH₄ sobre un periodo de 100 son 25 unidades de CO₂ (Salomon et al., 2007). Esta estimación considera las emisiones generadas en los alojamientos.

- g) Índice THI Temperatura y humedad (Machado et al., 2016a):

$$THI = (0.8 * Ta) + RH \left[\frac{Ta - 14.3}{100} \right] + 46.3 \quad (5)$$

Donde:

Ta = Temperatura del aire (°C)

H = Humedad relativa (%)

- h) Índice BGHI Humedad y temperatura de globo negro (de Oliveira Júnior et al., 2018)

$$BGHI = tbg + 0.36 tdp - 41.5 \quad (6)$$

Donde:

tbg: Temperatura de globo negro (°C)

tdp: temperatura de punto de rocío (°C)

3.2.8 Diseño estadístico

Para procesar la información se utilizó el método de Análisis de Componentes Principales (PCA) para obtener un modelo eficiente de tasas de emisión. A partir de las tipologías se obtuvo un modelo de 12 variables de caracterización. Adicionalmente, se desarrollaron los cálculos correlacionando las variables de tasas de emisión. Se utilizaron herramientas estadísticas descriptivas junto con el análisis de varianza (ANOVA). Todos los cálculos se desarrollaron en el software R.

3.3 Resultados y discusión

La Tabla 3-6 muestra la Tasa de Emisiones (ER) y el GWP por tipología constructiva. Según el meta-análisis desarrollado por (F X Philippe et al., 2013) las emisiones de CH₄ ER en la producción porcina está en el rango de 5 y 60 g día⁻¹ animal, además reporta valores de emisión de 12.8 vs 9.9 g día⁻¹ animal para un estudio desarrollado en granjas de cría con sistema de cama profunda y ventilación controlada. Otro estudio desarrollado bajo las mismas características tipológicas, pero en etapa de engorde encontró rangos de 7.2 - 25.1 g d⁻¹ animal⁻¹ (F X Philippe et al., 2012). En el presente estudio, se obtuvieron valores promedio de 6.14 g día⁻¹ animal⁻¹ (tabla 3-6), los cuales están por debajo de los encontrados en otros estudios, sin embargo, esto posiblemente se deba a que los alojamientos estudiados operan con ventilación natural y solo es posible compararlo con otros estudios desarrollados en sistemas con ventilación mecánica y tipo túnel. Asimismo, es importante resaltar que los pisos de los alojamientos evaluados son en concreto a los

cuales se les realizó una remoción en seco de los excrementos solidos o lavados frecuentes, por lo que se deben esperar menos procesos de fermentación y como consecuencia menores emisiones de CH₄. El resumen de los valores promedio, intervalos de confianza y desviación estándar para las tipologías estudiadas se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4 Valores promedio, intervalos de confianza y desviación estándar de cada variable

	<i>Media</i>	<i>intervalos de confianza</i>		<i>Std</i>
ER	607.90	440.75	775.04	±588.13
EVA	157.55	128.88	186.21	±100.88
P	854.81	839.62	870.00	±53.45
THI	74.95	73.62	76.28	±4.67
BGHI	73.21	71.80	74.61	±4.95
T	25.43	24.26	26.59	±4.10
CF	1.50	1.31	1.69	±0.68
AU	66.85	53.45	80.26	±47.17
Q	6.88	5.69	8.07	±4.20
AD	55.46	50.58	60.34	±17.17
hals	1.584.40	1449.70	1719.10	±473.98
RH	64.99	62.66	67.31	±8.18

Las tipologías que presentaron mayor ER AU son 2 y 4 las cuales se ubican en climas fríos y templados, esta alta emisión podría explicarse en parte por el área de ventilación natural (96 y 24.8 m²) más pequeño en comparación con las otras estructuras (media 157.5 m²), densidad de animales (70.5-76.3 kg m⁻²) ubicado por debajo del promedio (55.46 kg m⁻²), y peso de los animales (110 y 90 kg) por encima del promedio (83.3 kg). La tipología 1 exhibe valores para ER AU año⁻¹ (2.77) por debajo del promedio (12.5), que podría deberse a una baja densidad de animales (27.86 kg m⁻²) y baja temperatura (21.4 °C); entre las otras tipologías no hubo diferencias significativas.

GWP se utilizan como índice relativo para estandarizar las emisiones de GEI con la finalidad de tener una unidad la eficiencia con la que cada gas atrapa el calor en la atmósfera (Sedorovich et al., 2007), El índice intenta integrar los impactos climáticos globales de una acción específica, relaciona el impacto de las emisiones de un gas con una emisión equivalente de un gas CO₂. El promedio encontrado de GWP AU entre las 10

tipologías presentó un valor de 312.39 Kg año⁻¹ de CO₂ eq en un horizonte de tiempo GWP de 100 años. No fue posible encontrar valores estimados de GWP en cerdos por instalación en la revisión de la literatura, sin embargo, para tener una estimación de la magnitud, los resultados de las emisiones de las instalaciones de un estudio en una granja lechera (GWP AU 1,242 Kg year⁻¹ CO₂ eq) (Sedorovich et al., 2007), permite ratificar el menor GWP de la producción porcina.

Tabla 3-5 CH₄ ER por tipología constructiva

Tipología	ER		
	alojamiento (Kg año ⁻¹)	<i>std</i>	
1	51.90	±48.00	<i>b</i>
2	947.26	±531.01	<i>ab</i>
3	217.24	±127.24	<i>ab</i>
4	1018.29	±808.57	<i>ab</i>
5	1301.98	±916.15	<i>a</i>
6	315.21	±410.72	<i>ab</i>
7	354.65	±298.39	<i>ab</i>
8	563.48	±361.83	<i>ab</i>
9	507.75	±436.70	<i>ab</i>
10	801.20	±285.28	<i>ab</i>
Media	607.90		

Tabla 3-6 ER por animal, unidad animal (AU) y GWP AU

tipología	ER animal (Kg año ⁻¹ animal ⁻¹)	ER animal (g día ⁻¹ animal ⁻¹)	ER AU año ⁻¹	GWP AU (Kg año ⁻¹)
1	0.44	1,22	2.77	69.31
2	6.72	18,41	30.54	763.43
3	0.86	2,36	7.18	179.60
4	7.66	20,98	42.54	1063.38

5	2.17	5,96	9.45	236.26
6	0.66	1,82	4.74	118.50
7	1.10	3,03	4.80	120.09
8	1.09	3,00	7.82	195.38
9	0.92	2,53	10.26	256.44
10	0.76	2,08	4.86	121.47
Media	2.24	6,14	12.50	312.39

La Tabla 3-7 muestra los valores de concentración promedio de CH₄ (C) obtenidos en las instalaciones, y los índices THI y BGHI. Entre las tipologías 1,3, 6, 7, 8, 9 y 10 no fue posible encontrar diferencias significativas, siendo las 1, 3 y 6 las que tenían concentraciones más bajas. Las mayores concentraciones ocurrieron en las instalaciones 4 y 5 ubicadas en climas fríos y templados. La tipología 2 presentó valores de concentración muy altos de CH₄ (C) con respecto a la media y mediana; lo que podría explicarse por los resultados adversos en la mayoría de las variables medidas; altas temperaturas T (27.8°C), alta densidad animal AD (70.5 kg m⁻²), frecuencia de limpieza (CF) de 2 días y una de las velocidades de aire más bajas (v) (0.17 ms⁻¹). De la misma manera los valores de THI y BGHI alcanzados se muestran en la Tabla 3-7. Se puede observar que las 3 tipologías clasificadas en piso térmico frío (1, 4 y 8) se encuentran los mejores parámetros de confort, Las instalaciones que presentan un ambiente de mayor malestar térmico son las Tipologías 2, 5, 6, 7, 9 y 10, teniendo una mayor relación con el tipo de ventilación que por su ubicación en altura sobre el nivel del mar. Los valores más altos de BGHI y THI se encontraron en las tipologías 5, 6, 7 y 10, las cuales se ubican en climas templados y cálidos principalmente. a la tasa de emisiones (ER) se encontró que la tipología 1 tiene una diferencia significativa debido a los valores bajos que podrían estar relacionados con la temperatura promedio baja (21.24°C), alta humedad relativa promedio (76%) y baja densidad de animales con EA (27 k m⁻²), Se destaca la tipología 5 con una diferencia significativa entre los valores elevados de emisión de CH₄ (C) respecto a la media.

Tabla 3-7 Anova Concentración de CH₄ (ppm) e índices de confort térmico para cada tipología.

tipología	C	<i>std</i>		BGHI	<i>std</i>		THI	<i>Std</i>	
1	103.6	±66.58	<i>b</i>	69.4	±1.81	<i>a</i>	72.4	±2.50	<i>ab</i>
2	704.4	±391.26	<i>a</i>	73.4	±2.88	<i>a</i>	76.6	±3.20	<i>ab</i>
3	63.8	±33.27	<i>b</i>	72.4	±3.04	<i>a</i>	73.2	±2.28	<i>ab</i>
4	266.4	±130.10	<i>ab</i>	68.8	±2.28	<i>a</i>	68.6	±3.43	<i>b</i>
5	267.4	±215.40	<i>ab</i>	73.4	±2.79	<i>a</i>	76.0	±3.24	<i>ab</i>
6	66.2	±64.01	<i>b</i>	77.6	±3.50	<i>a</i>	79.2	±2.48	<i>a</i>
7	161.4	±131.26	<i>b</i>	75.4	±6.46	<i>a</i>	75.4	±5.72	<i>ab</i>
8	179.6	±129.39	<i>b</i>	69.0	±2.91	<i>a</i>	72.2	±2.94	<i>ab</i>
9	105.2	±78.8	<i>b</i>	74.8	±6.22	<i>a</i>	76.6	±5.41	<i>ab</i>
10	184.6	±57.2	<i>b</i>	78.0	±5.43	<i>a</i>	79.2	±4.54	<i>a</i>

La figura 3-2 y la tabla 3-8 presentan los resultados del análisis de componentes principales (PCA), desarrollado con la finalidad de encontrar correlaciones entre ER y las otras variables medidas. Hay registros bibliográficos que muestran que los niveles de producción de CH₄, pueden verse alterados por varios factores, como las condiciones de los alojamientos, el manejo del estiércol y la composición de la dieta (F X Philippe & Nicks, 2015). Esta investigación puede apoyar estos registros con los hallazgos de correlaciones significativas entre ER y CF, AU, Q, AD y RH, los resultados se presentan en la tabla 3-6. Según Gabriel et al., (2014) y Petersen et al., (2016) hay evidencia de que las emisiones de CH₄ se ven afectadas por la temperatura de manera directa. Sin embargo, no fue posible encontrar en este estudio una relación directa entre T y ER. Si bien la Fig.2 no indica una relación directa entre la altura sobre el nivel del mar (hals) y ER, se encontró que las tipologías 6 y 10 ubicadas en clima cálido, así como las tipologías 7 y 9 ubicadas en climas templados también tienen índices altos de estrés térmico, como se muestra en las tablas 3-5, 3-6.

Figura 3-2 Análisis de componentes principal (PCA)

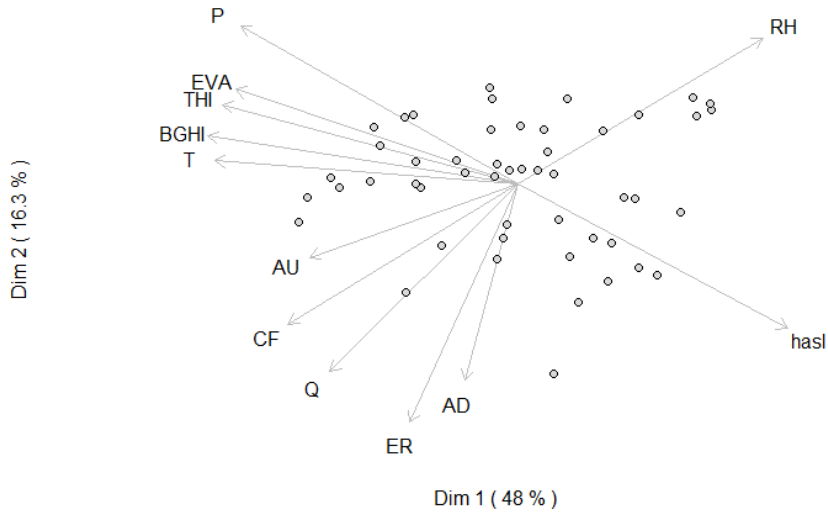


Tabla 3-8 Variables con correlación significativa con ER

	correlaciones	Valor P	Intervalos de confianza	
CF	0,309	0,029	0,034	0,541
AU	0,292	0,040	0,015	0,527
Q	0,463	0,001	0,212	0,657
AD	0,279	0,050	0,001	0,517
RH	-0,372	0,008	-0,589	-0,105

3.4 Conclusiones

Este estudio representa una primera aproximación para estimar las instalaciones del factor de emisión ER de CH₄ de los alojamientos en instalaciones de ceba de cerdos en Colombia. Los resultados obtenidos se suman a otros desarrollados en diferentes países que han mostrado evidencia de que las emisiones generadas en las instalaciones son importantes y deberían incorporarse en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Aunque los datos recopilados en esta revisión exhiben una gran variabilidad,

pueden usarse para guiar investigaciones futuras. El estudio muestra que en las diferentes tipologías constructivas utilizadas en Colombia que operan con ventilación natural, se presentan niveles significativos de ER, siendo mayor en los climas fríos y templados donde se concentra el 80% de la porcicultura del departamento de Antioquia. Además, muestra cómo estas tipologías en los meses más calurosos, que son la mayoría del año, deben utilizar sistemas que mejoren el confort térmico de los animales, ya que presentan condiciones adversas según los índices THI y BGHI encontrados.

Se espera que este trabajo sirva de base para avanzar en un inventario nacional de emisiones de gases en el sector porcino y orientar políticas y estrategias para minimizar el impacto que el sector porcino puede producir en el medio ambiente del país.

AGRADECIMIENTOS. Esta investigación es el resultado de una colaboración entre la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional de Colombia y el Laboratorio de Bioclimático Aplicado a la Agroindustria.

3.5 Referencias

- Ameen, R. F. M., & Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process. *Sustainable Cities and Society*, 44(October 2018), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.020>
- Bjerg, B., Brandt, P., Sørensen, K., Pedersen, P., & Zhang, G. (2019). Review of methods to mitigate heat stress among sows. *2019 ASABE Annual International Meeting, June*. <https://doi.org/10.13031/aim.201900741>
- Bjerg, B., Demeyer, P., Hoyaux, J., Didara, M., Grönroos, J., Hassouna, M., Amon, B., Bartzanas, T., Sándor, R., Fogarty, M., Klas, S., Schiavon, S., Juskiene, V., Radeski, M., Attard, G., Aarnink, A., Gülzari, Ş. Ö., Kuczyński, T., Figueiro, D., ... Norton, T. (2019). Review of legal requirements on ammonia and greenhouse gases emissions from animal production buildings in european countries. *2019 ASABE Annual International Meeting, June*, 23. <https://doi.org/10.13031/aim.201901070>
- Briukhanov, A., Subbotin, I., Uvarov, R., & Vasilev, E. (2017). Method of designing of manure utilization technology. *Agronomy Research*, 15(3), 658–663.
- Broucek, J. (2018). *Nitrous Oxide Release from Poultry and Pig Housing*. 27(2), 467–479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75871>
- Castrillón, N., González, V., Osorio, J. A., Montoya, A. P., & Correa, G. (2020). Assessment of the methane emission for different typologies of fattening swine facilities in the department of antioquia Colombia. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 2), 1189–1202. <https://doi.org/10.15159/AR.20.108>
- Cecchin, D., Pereira, C. R., Campos, A. T., Ferraz, P. F. P., Amaral, P. I. S., Sousa, F. A., Hüther, C. M., & Cruz, V. M. F. (2019). Behavior of swine hosted in facilities with

- different construction typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 7(1), 6–10. <https://doi.org/10.31893/2318-1265jabb.v7n1p6-10>
- Cecchin, D., Campos, A., Cruz, V., Sousa, F., Amaral, P., & Yanagi Junior, T. (2017). Air quality in swine growing and finishing facilities with different building typologies TT - Qualidade do ar em instalações para suínos em crescimento e terminação com diferentes tipologias construtivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 339–343. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p339-343>
- Cecchin, Daiane, Da Cruz, V. F., Campos, A. T., Sousa, F. A., Amaral, P. I. S., Da Silva Ramos Freitas, L. C., & Andrade, R. R. (2017). Thermal environment in growing and finishing pig facilities of different building typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 5(4), 118–123. <https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v5n4p118-123>
- CIGR. (2006). *ANIMAL HOUSING IN HOT CLIMATES: A multidisciplinary view* (I. de A. Nääs & D. J. Moura (eds.)). CIGR.
- de Oliveira Júnior, A. J., de Souza, S. R. L., da Cruz, V. F., Vicentin, T. A., & Glavina, A. S. G. (2018). Development of an android APP to calculate thermal comfort indexes on animals and people. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(October 2017), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.014>
- de Vries, M., & de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). *3rd National Agricultural Survey, Colombia*.
- Dominica, I., Suharjito, Noviantri, V., & Utama, D. N. (2018). Thermal comfort modelling based on house's architecture using ghost point quadratic explicit method. *International Review of Civil Engineering*, 9(4), 141–147. <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.14417>
- Ferrari, S., Costa, A., & Guarino, M. (2013). Heat stress assessment by swine related vocalizations. *Livestock Science*, 151(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.10.013>
- Gabriel, D., Allen, A., Bastviken, D., Conrad, R., Gudasz, C., St-Pierre, A., Thanh-Duc, N., & Del Giorgio, P. A. (2014). Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507(7493), 488–491. <https://doi.org/10.1038/nature13164>
- Gerber, P., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). *Facing climate change through livestock*.
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>
- Gobernación de Antioquia. (2014). *Anuario estadístico del sector agropecuario en el departamento de Antioquia*.
- Hansen, R., & Bjerg, B. (2018). *Natural ventilation's ability to prevent high indoor temperatures*. m(April).
- Huerta_Crispin, R., & Gas, J. (2012). Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos. In *Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos*.

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). *National Inventory of Greenhouse Gases (GHG) Colombia 2012*.
- Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2005). Atlas climatológico de Colombia. *Atlas Climatológico de Colombia*, 219. <http://www.ideam.gov.co/>
- Jackson, P., Guy, J. H., Sturm, B., Bull, S., & Edwards, S. A. (2018). An innovative concept building design incorporating passive technology to improve resource efficiency and welfare of finishing pigs. *Biosystems Engineering*, 174, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.008>
- Lenerts, A., Popluga, D., & Naglis-Liepa, K. (2019). Benchmarking the GHG emissions intensities of crop and livestock-derived agricultural commodities produced in Latvia. *Agronomy Research*, 17(5), 1942–1952. <https://doi.org/10.15159/AR.19.148>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. ., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016a). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agricola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. M., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016b). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agricola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- 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>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2019). National Agroclimatic Report May 2019. In *Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)* (Vol. 53).
- Monteny, G. J., Bannink, A., & Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(2–3), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.015>
- Myer, R., & Bucklin, R. (2012). Influence of Hot-Humid Environment on Growth Performance and Reproduction of Swine 1 Methods to Minimize Heat Stress. *University of Florida, IFAS Extension. AN 107*, 1–8.
- Nations Food and Agriculture - FAO. (2011). World Livestock 2011 - Livestock in food security World. In *FAO*. <https://doi.org/10.1080/00036841003742587>
- Noya, I., Villanueva-Rey, P., González-García, S., Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., & Moreira, M. T. (2017). Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4327–4338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.160>
- Noya, Isabel, Aldea, X., Gasol, C. M., González-García, S., Amores, M. J., Colón, J., Ponsá, S., Roman, I., Rubio, M. A., Casas, E., Moreira, M. T., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. *Journal of Environmental Management*, 171, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.039>
- OCDE/FAO. (2013). *OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.
- Osorio-Saraz, J. A., Ferreira-Tinoco, I. D. fatima, Gates, R. S., Oliveira-Rocha, K. S., Combatt-Caballero, E. M., & Campos-de-Sousa, F. (2014). Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. *Dyna*, 81(187), 137–143. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40806>
- Petersen, S. O., Olsen, A. B., Elsgaard, L., Triolo, J. M., & Sommer, S. G. (2016). Estimation

- of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. *PLoS ONE*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>
- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79(November 2018), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Philippe, F X., Laitat, M., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2012). Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.006>
- Philippe, F X, Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2013). Influence of permanent use of feeding stalls as living area on ammonia and greenhouse gas emissions for group-housed gestating sows kept on straw deep-litter. *Livestock Science*, 155(2–3), 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.005>
- Philippe, F X, & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 199, 10–25. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Philippe, François Xavier, Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3–4), 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012>
- Pietrosemoli, S., & Tang, C. (2020). Animal welfare and production challenges associated with pasture pig systems: A review. *Agriculture (Switzerland)*, 10(6), 1–34. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060223>
- Porkcolombia, & PigCHAMP. (2015). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*. (p. 34).
- Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2013). Life Cycle Assessment of pork production: A data inventory for the case of Germany. *Livestock Science*, 157(2–3), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.001>
- Reimert, I., Rodenburg, T. B., Ursinus, W. W., Kemp, B., & Bolhuis, J. E. (2014). Selection based on indirect genetic effects for growth, environmental enrichment and coping style affect the immune status of pigs. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108700>
- Rhodes, T., Appleby, M., Chinn, K., Douglas, L., Firkins, L., Houpt, K., Irwin, C., McGlone, J., Dundberg, P., Tokach, L., & Wills, R. (2005). A comprehensive review of housing for pregnant sows Members - Task Force Report. *Javma*, 227(10), 1580–1590.
- Rodrigues, N. E. B., Zangeronimo, M. G., & Fialho, E. T. (2010). Suínos Sob Estresse Térmico. *Revista Eletrônica Nutritime*, 7(2), 1197–1211.
- Ross, J. W., Hale, B. J., Gabler, N. K., Rhoads, R. P., Keating, A. F., & Baumgard, L. H. (2015). Physiological consequences of heat stress in pigs. *Animal Production Science*, 55(11–12), 1381–1390. <https://doi.org/10.1071/AN15267>
- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., LeRoy Miller, H. jr, & Chen, Z. (2007). Climate change 2007: The Physical Science Basis. In *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York* (Issues 1–4). <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6>
- Sedorovich, D. M., Rotz, A., & Richard, T. L. (2007). Greenhouse gas emissions from dairy farms. *2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers*, 9, 14. <https://doi.org/10.13031/2013.23112>

- Seibert, L., & Norwood, F. B. (2011). Production costs and animal welfare for four stylized hog production systems. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/10888705.2011.527596>
- Sharpe, R. ., Harper, L. ., & Simmons, J. . (2001). Methane emission from swine houses in North Carolina. *Chemosphere Global Change Science*, 3, 1–6.
- Sousa, F. C., Tinôco, I. F. F., Barbari, M., Baptista, F., Souza, C. F., Saraz, A. O., Coelho, D. J. R., & Silva, A. L. (2018). Diagnosis of air quality in broilers production facilities in hot climates. *Agronomy Research*, 16(2), 582–592. <https://doi.org/10.15159/AR.18.070>
- Steinfeld, H., & Gerber, P. (2010). Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18237–18238. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107>
- USDA. (2011). *Department of agriculture national agricultural statistics service agricultural - Agricultural Statistics 2010*. 1–9.
- XIONG, Y., MENG, Q. shi, GAO, J., TANG, X. fang, & ZHANG, H. fu. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0)

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este estudio representa una primera aproximación para estimar el factor de emisión ER de CH₄ de los alojamientos de ceba de cerdos en Colombia. Los resultados obtenidos se suman a otros desarrollados en diferentes países que han mostrado evidencia de que las emisiones generadas en las instalaciones son importantes y deberían incorporarse en los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Aunque los datos recopilados en esta revisión exhiben una gran variabilidad, pueden usarse para guiar investigaciones futuras. El estudio muestra que en las diferentes tipologías constructivas utilizadas en Colombia que operan con ventilación natural, se presentan niveles significativos de ER, siendo mayor en los climas fríos y templados donde se concentra el 80% de la porcicultura del estado de Antioquia. Además, muestra cómo estas tipologías en los meses más calurosos, que son la mayoría del año, deben utilizar sistemas que mejoren el confort térmico de los animales, ya que presentan condiciones adversas según los índices THI y BGHI encontrados.

Se espera que este trabajo sirva de base para avanzar en un inventario nacional de emisiones de gases en el sector porcino y orientar políticas y estrategias para minimizar el impacto que el sector porcino puede producir en el medio ambiente del país.

4.2 Recomendaciones

En el país no existen estudios robustos que permitan validar el aporte de las instalaciones en GEI, se considera importante continuar ampliando las mediciones a más tipologías y grupo etarios con la finalidad de obtener mayor información que permita la construcción de factores de emisiones nacionales.

5. Bibliografía

- Ameen, R. F. M., & Mourshed, M. (2019). Urban sustainability assessment framework development: The ranking and weighting of sustainability indicators using analytic hierarchy process. *Sustainable Cities and Society*, 44(October 2018), 356–366. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.020>
- Bjerg, B., Brandt, P., Sørensen, K., Pedersen, P., & Zhang, G. (2019). Review of methods to mitigate heat stress among sows. 2019 ASABE Annual International Meeting, June. <https://doi.org/10.13031/aim.201900741>
- Bjerg, B., Demeyer, P., Hoyaux, J., Didara, M., Grönroos, J., Hassouna, M., Amon, B., Bartzanas, T., Sándor, R., Fogarty, M., Klas, S., Schiavon, S., Juskiene, V., Radeski, M., Attard, G., Aarnink, A., Gülzari, Ş. Ö., Kuczyński, T., Figueiro, D., ... Norton, T. (2019). Review of legal requirements on ammonia and greenhouse gases emissions from animal production buildings in european countries. 2019 ASABE Annual International Meeting, June, 23. <https://doi.org/10.13031/aim.201901070>
- Briukhanov, A., Subbotin, I., Uvarov, R., & Vasilev, E. (2017). Method of designing of manure utilization technology. *Agronomy Research*, 15(3), 658–663.
- Broucek, J. (2018). Nitrous Oxide Release from Poultry and Pig Housing. 27(2), 467–479. <https://doi.org/10.15244/pjoes/75871>
- Castrillón, N., González, V., Osorio, J. A., Montoya, A. P., & Correa, G. (2020). Assessment of the methane emission for different typologies of fattening swine facilities in the department of antioquia Colombia. *Agronomy Research*, 18(Special Issue 2), 1189–1202. <https://doi.org/10.15159/AR.20.108>
- Cecchin, D., Pereira, C. R., Campos, A. T., Ferraz, P. F. P., Amaral, P. I. S., Sousa, F. A., Hüther, C. M., & Cruz, V. M. F. (2019). Behavior of swine hosted in facilities with different construction typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 7(1), 6–10. <https://doi.org/10.31893/2318-1265jabb.v7n1p6-10>
- Cecchin, D., Campos, A., Cruz, V., Sousa, F., Amaral, P., & Yanagi Junior, T. (2017). Air quality in swine growing and finishing facilities with different building typologies TT - Qualidade do ar em instalações para suínos em crescimento e terminação com diferentes tipologias construtivas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(5), 339–343. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n5p339-343>
- Cecchin, Daiane, Da Cruz, V. F., Campos, A. T., Sousa, F. A., Amaral, P. I. S., Da Silva Ramos Freitas, L. C., & Andrade, R. R. (2017). Thermal environment in growing and finishing pig facilities of different building typologies. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 5(4), 118–123. <https://doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v5n4p118-123>
- CIGR. (2006). ANIMAL HOUSING IN HOT CLIMATES: A multidisciplinary view (I. de A. Nääs & D. J. Moura (eds.)). CIGR.
- de Oliveira Júnior, A. J., de Souza, S. R. L., da Cruz, V. F., Vicentin, T. A., & Glavina, A. S.

- G. (2018). Development of an android APP to calculate thermal comfort indexes on animals and people. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(October 2017), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.05.014>
- de Vries, M., & de Boer, I. J. M. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1–3), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2016). 3rd National Agricultural Survey, Colombia.
- Dominica, I., Suharjito, Noviantri, V., & Utama, D. N. (2018). Thermal comfort modelling based on house's architecture using ghost point quadratic explicit method. *International Review of Civil Engineering*, 9(4), 141–147. <https://doi.org/10.15866/irece.v9i4.14417>
- Ferrari, S., Costa, A., & Guarino, M. (2013). Heat stress assessment by swine related vocalizations. *Livestock Science*, 151(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2012.10.013>
- Gabriel, D., Allen, A., Bastviken, D., Conrad, R., Gudasz, C., St-Pierre, A., Thanh-Duc, N., & Del Giorgio, P. A. (2014). Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales. *Nature*, 507(7493), 488–491. <https://doi.org/10.1038/nature13164>
- Gerber, P. ., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). Facing climate change through livestock.
- Gitz, V., Meybeck, A., Lipper, L., Young, C., & Braatz, S. (2016). Climate change and food security: Risks and responses. In Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.1080/14767058.2017.1347921>
- Gobernación de Antioquia. (2014). Anuario estadístico del sector agropecuario en el departamento de Antioquia.
- Hansen, R., & Bjerg, B. (2018). Natural ventilation's ability to prevent high indoor temperatures. *m*(April).
- Huerta_Crispin, R., & Gas, J. (2012). Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos. In Manual de Buenas Prácticas de Producción Porcina. Lineamientos generales para el pequeño y mediano productor de cerdos.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015). National Inventory of Greenhouse Gases (GHG) Colombia 2012.
- Instituto Colombiano de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2005). Atlas climatológico de Colombia. Atlas Climatológico de Colombia, 219. <http://www.ideam.gov.co/>
- Jackson, P., Guy, J. H., Sturm, B., Bull, S., & Edwards, S. A. (2018). An innovative concept building design incorporating passive technology to improve resource efficiency and welfare of finishing pigs. *Biosystems Engineering*, 174, 190–203. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.008>
- Lenerts, A., Popluga, D., & Naglis-Liepa, K. (2019). Benchmarking the GHG emissions intensities of crop and livestock–derived agricultural commodities produced in Latvia. *Agronomy Research*, 17(5), 1942–1952. <https://doi.org/10.15159/AR.19.148>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. ., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016a). Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- Machado, S. T., Nääs, I. D. A., Dos Reis, J. G. M., Caldara, F. R., & Santos, R. C. (2016b).

- Sows and piglets thermal comfort: A comparative study of the tiles used in the farrowing housing. *Engenharia Agrícola*, 36(6), 996–1004. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p996-1004/2016>
- 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>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2019). National Agroclimatic Report May 2019. In Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) (Vol. 53).
- Monteny, G. J., Bannink, A., & Chadwick, D. (2006). Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 112(2–3), 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.015>
- Myer, R., & Bucklin, R. (2012). Influence of Hot-Humid Environment on Growth Performance and Reproduction of Swine 1 Methods to Minimize Heat Stress. University of Florida, IFAS Extension. AN 107, 1–8.
- Nations Food and Agriculture - FAO. (2011). World Livestock 2011 - Livestock in food security World. In FAO. <https://doi.org/10.1080/00036841003742587>
- Noya, I., Villanueva-Rey, P., González-García, S., Fernandez, M. D., Rodriguez, M. R., & Moreira, M. T. (2017). Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4327–4338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.160>
- Noya, Isabel, Aldea, X., Gasol, C. M., González-García, S., Amores, M. J., Colón, J., Ponsá, S., Roman, I., Rubio, M. A., Casas, E., Moreira, M. T., & Boschmonart-Rives, J. (2016). Carbon and water footprint of pork supply chain in Catalonia: From feed to final products. *Journal of Environmental Management*, 171, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.039>
- OCDE/FAO. (2018). OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2013-2022. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.
- Osorio-Saraz, J. A., Ferreira-Tinoco, I. D. fatima, Gates, R. S., Oliveira-Rocha, K. S., Combatt-Caballero, E. M., & Campos-de-Sousa, F. (2014). Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. *Dyna*, 81(187), 137–143. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n187.40806>
- Petersen, S. O., Olsen, A. B., Elsgaard, L., Triolo, J. M., & Sommer, S. G. (2016). Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. *PLoS ONE*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>
- Pezzopane, J. R. M., Nicodemo, M. L. F., Bosi, C., Garcia, A. R., & Lulu, J. (2019). Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. *Journal of Thermal Biology*, 79(November 2018), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.12.015>
- Philippe, F X., Laitat, M., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2012). Ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs kept on two types of straw floor. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 150, 45–53. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.006>
- Philippe, F X., Laitat, M., Wavreille, J., Nicks, B., & Cabaraux, J. F. (2013). Influence of permanent use of feeding stalls as living area on ammonia and greenhouse gas emissions for group-housed gestating sows kept on straw deep-litter. *Livestock Science*, 155(2–3), 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.05.005>
- Philippe, F X., & Nicks, B. (2015). Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure.

- Agriculture, Ecosystems and Environment, 199, 10–25.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Philippe, François Xavier, Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141(3–4), 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.012>
- Pietrosemoli, S., & Tang, C. (2020). Animal welfare and production challenges associated with pasture pig systems: A review. *Agriculture (Switzerland)*, 10(6), 1–34. <https://doi.org/10.3390/agriculture10060223>
- Porkcolombia, & PigCHAMP. (2015). *Guía de mejores técnicas disponibles para el sector porcícola en Colombia*. (p. 34).
- Reckmann, K., Traulsen, I., & Krieter, J. (2013). Life Cycle Assessment of pork production: A data inventory for the case of Germany. *Livestock Science*, 157(2–3), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.09.001>
- Reimert, I., Rodenburg, T. B., Ursinus, W. W., Kemp, B., & Bolhuis, J. E. (2014). Selection based on indirect genetic effects for growth, environmental enrichment and coping style affect the immune status of pigs. *PLoS ONE*, 9(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108700>
- Rhodes, T., Appleby, M., Chinn, K., Douglas, L., Firkins, L., Houpt, K., Irwin, C., McGlone, J., Dundberg, P., Tokach, L., & Wills, R. (2005). A comprehensive review of housing for pregnant sows Members - Task Force Report. *Javma*, 227(10), 1580–1590.
- Rodrigues, N. E. B., Zangeronimo, M. G., & Fialho, E. T. (2010). Suínos Sob Estresse Térmico. *Revista Eletrônica Nutritime*, 7(2), 1197–1211.
- Ross, J. W., Hale, B. J., Gabler, N. K., Rhoads, R. P., Keating, A. F., & Baumgard, L. H. (2015). Physiological consequences of heat stress in pigs. *Animal Production Science*, 55(11–12), 1381–1390. <https://doi.org/10.1071/AN15267>
- Salomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M. M. B., LeRoy Miller, H. jr, & Chen, Z. (2007). *Climate change 2007: The Physical Science Basis*. In Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York (Issues 1–4). <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9372-6>
- Sedorovich, D. M., Rotz, A., & Richard, T. L. (2007). Greenhouse gas emissions from dairy farms. 2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers, 9, 14. <https://doi.org/10.13031/2013.23112>
- Seibert, L., & Norwood, F. B. (2011). Production costs and animal welfare for four stylized hog production systems. *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/10888705.2011.527596>
- Sharpe, R. ., Harper, L. ., & Simmons, J. . (2001). Methane emission from swine houses in North Carolina. *Chemosphere Global Change Science*, 3, 1–6.
- Sousa, F. C., Tinôco, I. F. F., Barbari, M., Baptista, F., Souza, C. F., Saraz, A. O., Coelho, D. J. R., & Silva, A. L. (2018). Diagnosis of air quality in broilers production facilities in hot climates. *Agronomy Research*, 16(2), 582–592. <https://doi.org/10.15159/AR.18.070>
- Steinfeld, H., & Gerber, P. (2010). Livestock production and the global environment: Consume less or produce better? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18237–18238. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012541107>
- USDA. (2011). Department of agriculture national agricultural statistics service agricultural - Agricultural Statistics 2010. 1–9.
- XIONG, Y., MENG, Q. shi, GAO, J., TANG, X. fang, & ZHANG, H. fu. (2017). Effects of relative humidity on animal health and welfare. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1653–1658. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61532-0](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61532-0)

