

IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS PRODUCTIVOS Y AMBIENTALES CRÍTICOS EN GRANJAS PORCÍCOLAS COMERCIALES INDUSTRIALES: UN ENFOQUE CUALITATIVO DESDE ANTIOQUIA, COLOMBIA

Oscar H. Velásquez-Arboleda¹, Ricardo Colmenares-Flórez², Janeth Areiza-Gómez³, José D. Aguirre-Hoyos⁴

^{1 2 3} Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo de Investigación GIBA · Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia. ⁴ Facultad de Ingenierías, Semillero Ícaro · Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Correspondencia: ohvelasquez@elpoli.edu.co

RESUMEN

Objetivo: Identificar los parámetros productivos, ambientales, sanitarios y de bienestar críticos en granjas porcícolas de la categoría Comercial Industrial en Antioquia, Colombia, como insumo para el diseño de un paquete tecnológico basado en Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA).

Metodología: enfoque mixto con diseño no experimental de tipo observacional, complementado con elementos de Investigación-Acción Participativa (IAP). En la fase cualitativa se realizaron entrevistas semiestructuradas y grupos focales con experiencia en granjas comerciales analizadas mediante codificación temática.

Resultados: Se priorizaron 47 parámetros distribuidos en cuatro categorías: (1) zootécnicos/productivos: indicadores generales, fase reproductiva y ceba; (2) ambientales: variables térmicas, gases tóxicos y manejo ambiental; (3) sanitarios; y (4) de bienestar animal.

Conclusiones: se sientan las bases metodológicas para el desarrollo de una IoT-IA que permita la toma de decisiones basada en datos en granjas comerciales industriales de Antioquia.

Palabras clave: parámetros zootécnicos; monitoreo ambiental; porcicultura comercial; IoT; bienestar animal; Antioquia.

IDENTIFICATION OF CRITICAL PRODUCTIVE AND ENVIRONMENTAL PARAMETERS IN COMMERCIAL-INDUSTRIAL PIG FARMS: A QUALITATIVE APPROACH FROM ANTIOQUIA, COLOMBIA

ABSTRACT

Objective: To identify the critical productive, environmental, health, and welfare parameters in swine farms of the Industrial Commercial category in Antioquia, Colombia, as an input for the design of a technological package based on the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI).

Methodology: A mixed-methods approach with a non-experimental observational design, complemented by elements of Participatory Action Research (PAR). In the qualitative phase, semi-structured interviews and focus groups were conducted with participants experienced in commercial farms, which were analyzed using thematic coding.

Results: Forty-seven (47) parameters were prioritized and distributed into four categories: (1) zootechnical/productive: general indicators, reproductive phase, and fattening; (2) environmental: thermal variables, toxic gases, and environmental management; (3) health; and (4) animal welfare.

Conclusions: This study lays the methodological foundations for the development of an IoT-AI system that enables data-driven decision-making in industrial commercial farms in Antioquia.

Keywords: zootechnical parameters; environmental monitoring; commercial pig farming; IoT; animal welfare; Antioquia.

Cómo citar este artículo: O. Velásquez-Arboleda, R. Colmenares-Flórez, J. Areiza-Gómez, J. Aguirre-Hoyos. "Identificación de parámetros productivos y ambientales críticos en granjas porcícolas comerciales industriales: Un enfoque cualitativo desde Antioquia, Colombia", *Revista Politécnica*, vol.22, no.43 pp.119-28, 2026. DOI:10.33571/rpolitec.v22n43a8

1. INTRODUCCIÓN

La porcicultura colombiana ha experimentado una transformación productiva sin precedentes en las últimas dos décadas. Con 608.752 toneladas de carne producidas en 2024, un incremento del 7,8 % frente al año anterior, y 10.668.276 cabezas censadas a enero de 2026, Colombia se posiciona como el tercer productor de porcinos en América Latina y el decimotercero a nivel mundial [2] [3]. El departamento de Antioquia lidera este crecimiento con el 42,4 % de la producción nacional equivalente a 258.004 toneladas y 3.614.465 animales, configurándose como el epicentro de la industria porcícola del país [2].

Sin embargo, este dinamismo productivo contrasta con una profunda asimetría estructural. Según la clasificación del ICA bajo la Resolución 076509 de 2020, el 78,38 % de los predios porcícolas colombianos pertenece a la categoría de traspatio, pero alberga apenas el 8,6 % de los animales. En el extremo opuesto, el 0,47 % de las granjas, clasificadas como tecnificadas, concentra el 63,6 % del inventario nacional [2]. En la franja intermedia, las granjas Comerciales Industriales predios con 10 a 99 hembras de cría y/o 100 a 599 cerdos de engorde, con bioseguridad formal representan el 2,12 % de los predios y el 17,07 % de los animales, constituyendo el segmento de mayor potencial de modernización tecnológica en términos de escala, conectividad y disposición para adoptar innovaciones [4].

A pesar de su relevancia estratégica, las granjas Comerciales Industriales enfrentan una desconexión crítica: la medición de los parámetros productivos y zootécnicos ocurre de manera fragmentada, discontinua y predominantemente manual, mientras que el monitoreo de las variables ambientales cuando existe se realiza de forma aislada, sin correlacionarse con los indicadores de desempeño animal [5]. Esta brecha impide que los productores identifiquen oportunamente patrones predictivos de problemas sanitarios, ineficiencias nutricionales o deficiencias en el confort térmico de sus animales.

La literatura internacional ha documentado de forma consistente que los parámetros ambientales ejercen una influencia directa sobre la productividad porcina. El estrés calórico definido como la exposición de los animales a temperaturas superiores a su zona termoneutral (17,4–23,2 °C para cerdos de engorde) reduce el consumo voluntario de alimento, desvía la energía metabólica hacia la termorregulación y deteriora los índices de conversión alimenticia [6]. La concentración de amoníaco (NH₃) en el interior de los galpones, cuando supera los 20–25 ppm, simula sintomatologías respiratorias virales, induce al productor a medicaciones innecesarias con antibióticos y causa daño pulmonar progresivo [7] [8]. El dióxido de carbono (CO₂) ha sido identificado recientemente como el mejor predictor individual de la salud respiratoria porcina (R² = 0,862), según modelos de *Machine Learning* entrenados con datos de monitoreo ambiental continuo [9].

Frente a esta problemática, el Grupo de Investigación GIBA del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid formuló el proyecto 'Diseño de un paquete tecnológico validado basado en Internet de las Cosas (IoT) e Inteligencia Artificial (IA) para la medición de parámetros productivos y ambientales en granjas comerciales industriales porcícolas'. El Objetivo Específico 1 de dicho proyecto es identificar los principales parámetros productivos y ambientales críticos en granjas porcícolas, como base para el diseño de los sensores IoT y la plataforma de análisis de datos.

El presente artículo reporta los resultados de esta primera fase investigativa. Su contribución es doble: metodológicamente, demuestra la validez y pertinencia del enfoque cualitativo mixto en la investigación agropecuaria aplicada; y técnicamente, proporciona una taxonomía validada por expertos de los parámetros críticos que debe monitorear una plataforma de precisión destinada al segmento Comercial Industrial del sector porcícola colombiano. La relevancia del estudio se enmarca, además, en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 2 (Hambre Cero), 9 (Industria, Innovación e Infraestructura) y 12 (Producción y Consumo Responsables).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Parámetros Zootécnicos y Productivos en Porcicultura

Los indicadores clave de desempeño (KPI) en producción porcina constituyen la base de la gestión técnica y financiera de cualquier explotación. La revisión de la literatura permite organizarlos en tres niveles: indicadores globales del ciclo completo, parámetros de la fase reproductiva y parámetros de las fases de precebo y ceba.

2.1.1 Indicadores Globales del Ciclo Completo

El indicador macro de referencia en sistemas de ciclo completo es el volumen de kilogramos vendidos por hembra al año (kg/HA), que integra en una sola métrica la eficiencia reproductiva, el crecimiento y la supervivencia de la pira (Koketsu et al., 2020). Estrechamente relacionados con este KPI se encuentran el Índice de Conversión Alimenticia (ICA) y la Ganancia Diaria de Peso (GDP).

El ICA es el diferenciador de costos más poderoso en la cadena productiva, dado que el alimento representa entre el 60 % y el 70 % del costo total de producción [11]. Los valores de referencia para granjas competitivas en ceba (25–125 kg) oscilan entre 2,4 y 3,5 kg de alimento por kg de ganancia. Guan et al. [12] demostraron, con datos de más de 6,1 millones de cerdos comerciales en China, que el ICA tiene una correlación de $r = -0,720$ con el índice de eficiencia de engorde, siendo el segundo factor más importante después de la GDP. Una mejora de 0,1 unidades en ICA equivale a un ahorro estimado de 3–4 USD por cerdo de mercado. La eficiencia alimenticia mejora un 1 % por cada 100 micras de reducción en el tamaño de partícula del alimento, y un 8 % con la peletización (Navales et al., 2025).

La GDP es el factor con mayor correlación con la eficiencia de engorde ($r = 0,808$; [12]). Los valores de referencia modernos son: fase de crecimiento (25–60 kg): 800–950 g/día; fase de finalización (60–130 kg): 900–1.100 g/día; y promedio destete-finalización: 750–900 g/día, alcanzando pesos de mercado de 120–130 kg en 5–6 meses con genéticas mejoradas.

2.1.2 Parámetros de la Fase Reproductiva

El indicador integrado de referencia de productividad de la cerda es el número de lechones destetados por hembra al año (LDHA). Los *benchmarks* actuales son: 29,45 LDHA en granjas comerciales españolas (2023), 30,16 como promedio de la Unión Europea, y superiores a 35 LDHA en los líderes daneses [14]. La máxima teórica de partos por cerda al año es 2,57 (basada en 114 días de gestación + 21 días de lactancia + 7 días de recubrición).

El tamaño de camada ha experimentado avances genéticos notables: el progreso es de +0,32 lechones/camada/año, con cerdas hiperprolíficas danesas alcanzando 17,5 lechones nacidos vivos [15]. Sin embargo, Boonkum et al. [16] documentaron una correlación genética desfavorable: la selección por tamaño de camada reduce el peso al nacimiento y aumenta la variabilidad, incrementando la mortalidad predestete. Esta tensión genética es un argumento técnico central para el monitoreo individual de lechones.

La mortalidad predestete constituye el principal cuello de botella productivo actual. Will et al. [17] reportaron, con datos de 47 granjas de cría y aproximadamente 20 millones de lechones, una mortalidad predestete promedio del 14,02 % (IC 95 %: 13,90–14,14 %), con 19 factores de riesgo significativos identificados. Paiva et al. [18] documentaron que la mortalidad global de cerdas ha aumentado de 7,32 % en 2012 a 13,56 % en 2021, con causas principales como muertes súbitas (30,89 %), problemas locomotores (29,10 %) y prolapsos (26,96 %).

2.1.3 Parámetros de las Fases de Precebo y Ceba

En las fases de precebo (7–25 kg) y ceba (25–110 kg), los parámetros fundamentales son GDP, ICA y consumo de alimento. Gebhardt et al. [19] reportaron mortalidades posdestete promedio de 3,6 % en precebo, 4,1 % en ceba y 5,6 % en el segmento destete-finalización. El consumo de alimento actúa como señal temprana de problemas sanitarios o de confort ambiental; su monitoreo diario es estándar en granjas tecnificadas, aún ausente en la mayoría de granjas Comerciales Industriales.

2.2 Parámetros Ambientales Críticos

2.2.1 Temperatura y Estrés Calórico

El ambiente térmico es el parámetro ambiental con mayor impacto documentado sobre la productividad porcina. Los cerdos carecen de glándulas sudoríparas funcionales, lo que los hace especialmente vulnerables al estrés calórico. La zona de confort térmico máxima para cerdos de engorde entre 17,4 °C y 23,2 °C, documentando que el consumo de alimento disminuye cuando la temperatura supera los 20 °C, con efectos más pronunciados en cerdos de mayor peso.

Johnson y Cecil [20], cuantificaron el impacto económico del estrés calórico en la industria porcina de EE.UU. en más de 520 millones de dólares anuales, advirtiendo que las cerdas lactantes experimentan estrés calórico a temperaturas superiores a 20 °C. Hu et al. [21], identificaron en su revisión sobre sistemas de ventilación y refrigeración que la ventilación individual y la ventilación combinada de suministro/extracción son las tendencias más prometedoras para el control térmico eficiente.

2.2.2 Gases Tóxicos: NH₃, H₂S y CO₂

El monitoreo continuo de gases tóxicos en el interior de los galpones es una prioridad sanitaria ampliamente documentada. El amoníaco (NH₃) es el gas de mayor impacto operacional en porcicultura: concentraciones

entre 10 y 20 ppm representan la condición ambiental mínima aceptable; valores superiores a 20–25 ppm irritan las mucosas respiratorias y simulan sintomatologías de enfermedades virales [7]. Wang et al. [8], demostraron experimentalmente que la exposición a 80 ppm de NH_3 produce lesión pulmonar, respuesta inflamatoria y disrupción de la red de genes del reloj circadiano pulmonar en cerdos.

Peng et al. [22], desarrollaron modelos predictivos de NH_3 (LSTM, GRU, Transformer) basados en monitoreo continuo de temperatura, humedad, CO_2 y tasa de ventilación, documentando que en instalaciones porcinas la concentración de NH_3 fluctúa entre 1,77 y 20,94 ppm y que la temperatura interior se mantiene típicamente entre 23,5 °C y 28,0 °C. Parsiegel et al. [23], presentaron un diseño de array virtual de sensores MOS para monitoreo de NH_3 en rango de 1–30 ppm con una frecuencia de dos lecturas por minuto, como alternativa de bajo costo a los sensores electroquímicos de referencia.

El sulfuro de hidrógeno (H_2S) presenta un perfil de riesgo diferente: sus niveles habituales en edificios porcinos son bajos (promedio 286,5 ppb), pero durante la agitación de purines puede alcanzar 100 ppm o más, superando el límite de exposición a corto plazo de 5 ppm [24]. El dióxido de carbono (CO_2), frecuentemente subestimado como parámetro de monitoreo, fue identificado por Laguna et al. (2024) como el mejor predictor individual de salud respiratoria en sistemas de alojamiento controlado ($R^2 = 0,862$ con algoritmo Random Forest), con niveles de 847 ppm en condiciones normales versus 2.740 ppm en condiciones deficientes. Pessoa et al. [25], también documentaron que las condiciones ambientales correlacionan con la frecuencia de tos incluso en granjas libres de enfermedad respiratoria diagnosticada, subrayando el valor del monitoreo continuo.

2.3 Marco Regulatorio: Resolución ICA 076509 de 2020

La Resolución ICA 076509 de 2020, que derogó la Resolución 2640 de 2007, establece el marco normativo vigente para la producción porcina primaria en Colombia y los requisitos para la certificación en Buenas Prácticas Ganaderas (BPG). Esta norma define conceptos operativos críticos: la bioseguridad como las medidas físicas y de gestión para mitigar la entrada y propagación de patógenos; y el bienestar animal como el estado físico y mental del cerdo en relación con su entorno, conforme a la Ley 1774 de 2016 [26], prohibiendo expresamente el uso de lavazas como alimento (Art. 7.6).

En términos de gestión de parámetros sanitarios, la resolución exige: prescripción escrita de médico veterinario para todo tratamiento (Art. 6.9), control de inventario de biológicos y medicamentos con registro de lote y fecha de vencimiento (Art. 6.13), uso de una aguja por camada en lechones o cambio cada 15 animales (Art. 6.12), y cumplimiento del 100 % de los tiempos de retiro de medicamentos como criterio fundamental de certificación. El incumplimiento de cualquier criterio fundamental impide la certificación [4]

2.4 Tecnologías de Monitoreo Inteligente en Porcicultura

La revisión sistemática de Stygar et al. [27] identificó 83 tecnologías de *Precision Livestock Farming* (PLF) comercialmente disponibles para cerdos, que integran acelerómetros, micrófonos, cámaras, sensores térmicos y sensores ambientales. Estas tecnologías permiten el monitoreo continuo en tiempo real de indicadores de bienestar animal según el protocolo Welfare Quality®, que evalúa cuatro principios: buena alimentación, buen alojamiento (confort térmico y facilidad de movimiento), buena salud y comportamiento apropiado [28].

En el plano de la conectividad, los sistemas IoT para porcicultura emplean protocolos de comunicación como LoRaWAN, MQTT, NB-IoT, Wi-Fi, Zigbee y BLE, con procesamiento distribuido entre dispositivos de borde y plataformas en la nube [29]. Estos autores validaron un sistema basado en tecnología Mioty con sensores SHT31A (precisión $\pm 0,2$ °C y $\pm 1,5$ % HR) en un lote de 2.354 cerdos, logrando una ICA de 1,51 y una ganancia de peso de 0,375 kg/día mediante la optimización ambiental en tiempo real. Wang et al. [8] documentaron que sistemas de visión artificial basados en YOLOv4 alcanzan el 94,33 % de precisión en la detección de cerdos en instalaciones, mientras que el seguimiento de actividad individual correlaciona negativamente con temperatura, humedad y amoníaco ambiental. Mateo-Fornes et al. [31], desarrollaron, específicamente para el segmento reproductor, un sistema IoT basado en etiquetas RFID, cámaras con CNN y sensores ambientales para estimación de reservas corporales en cerdas gestantes.

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño del Estudio

El estudio adoptó un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo) bajo un modelo de fusión convergente, en el que los hallazgos cualitativos de las entrevistas y grupos focales se contrastaron con la evidencia cuantitativa de la literatura científica para validar la selección y priorización de los parámetros. El componente cualitativo sigue el diseño no experimental de tipo observacional con elementos de Investigación-Acción Participativa (IAP), que garantiza la aplicabilidad práctica de los hallazgos en el contexto productivo colombiano [32].

El estudio se enmarca en el paradigma fenomenológico-interpretativo, que busca comprender las experiencias, percepciones y necesidades de los actores del sector porcícola productores, técnicos y especialistas respecto al monitoreo de parámetros productivos y ambientales. Este enfoque es especialmente pertinente cuando el objetivo es diseñar soluciones tecnológicas contextualmente adaptadas, como lo demostró Akinyemi et al. [32] en su estudio cualitativo sobre la adopción de PLF en la industria porcina, utilizando exactamente el mismo diseño metodológico.

3.2 Participantes y Criterios de Elegibilidad

La selección de participantes siguió un muestreo determinístico no probabilístico de juicio (*purposive sampling*), tomando como criterios: acceso a tecnología de comunicación en la granja, ubicación en el departamento de Antioquia, seguridad de la zona y compromiso demostrado del productor. La población de referencia es de 720 predios en la categoría Comercial Industrial en Antioquia, según el Censo Pecuario del ICA [3].

Los criterios de inclusión para los productores fueron: clasificación ICA en la categoría Comercial Industrial (10 a 99 hembras de cría y/o 100 a 599 cerdos de engorde), acceso a Internet en la unidad productiva y ubicación en el departamento de Antioquia. Los especialistas (médicos veterinarios, zootecnistas, ingenieros agropecuarios) debían acreditar mínimo dos años de experiencia activa en el manejo productivo o sanitario de granjas porcícolas comerciales. Se excluyeron granjas tecnificadas, de tipo comercial familiar y de traspatio, así como productores sin acceso a Internet.

3.3 Técnicas e Instrumentos

3.3.1 Entrevistas Semiestructuradas

Se diseñó una guía de entrevista con preguntas abiertas organizadas en tres ejes temáticos: (1) experiencia en el registro y análisis de parámetros productivos; (2) desafíos en el monitoreo ambiental y su relación con el desempeño animal; y (3) percepción sobre la factibilidad de uso de tecnologías IoT en el contexto de su granja. El instrumento fue validado en contenido por tres expertos en producción porcina y metodología de investigación, y ajustado mediante una prueba piloto aplicada a dos productores y un médico veterinario.

3.3.2 Grupos Focales

Los grupos focales fueron diseñados para discutir colectivamente soluciones tecnológicas y validar los requisitos del paquete tecnológico con actores clave. La guía temática incluyó ejes sobre: problemas frecuentes en las granjas, priorización de parámetros de monitoreo, factibilidad de uso de sensores IoT y usabilidad de la plataforma. Se realizó una sesión piloto con técnicos agrícolas para ajustar el instrumento.

3.3.3 Análisis de Datos

El análisis cualitativo siguió el protocolo de análisis temático de Braun y Clarke [1], en seis fases: familiarización con los datos, generación de códigos iniciales, búsqueda de temas, revisión de temas, definición y nomenclatura de temas, y producción del informe. Los códigos fueron generados de forma inductiva a partir de las transcripciones y deductiva a partir del marco teórico previo. La codificación fue realizada de forma independiente por dos investigadores, con resolución de discrepancias mediante discusión hasta alcanzar consenso.

Los criterios de calidad del componente cualitativo siguieron las recomendaciones de Ritter et al. [33], para investigación cualitativa en ciencias pecuarias: credibilidad (verificación de miembros mediante devolución de resultados a los participantes), transferibilidad (descripción densa del contexto), dependabilidad (auditoría del proceso de codificación) y confirmabilidad (reflexividad de los investigadores mediante memorandos analíticos).

3.4 Consideraciones Éticas

El proyecto fue sometido al Comité de Ética del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y clasificado dentro de la categoría 'sin riesgo' conforme al Artículo 11 de la Resolución 8430 de 1993 [34], dado que no realiza ninguna intervención o modificación intencionada de variables biológicas, fisiológicas o psicológicas de los participantes. Todos los participantes firmaron consentimiento informado antes de las entrevistas y grupos focales. La confidencialidad y protección de datos personales se gestionó conforme a la Ley 1581 de 2012 [35].

4. RESULTADOS

4.1 Parámetros Zootécnicos/Productivos Identificados

El análisis temático de las entrevistas y grupos focales, contrastado con la revisión de la literatura, permitió identificar y organizar 47 parámetros en cuatro categorías. En el dominio zootécnico/productivo se organizaron tres subcategorías de acuerdo con la fase del ciclo productivo (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros zootécnicos/productivos identificados por fase productiva.

Subcategoría	Parámetro / Variable	Referencia / Benchmark
Generales / Económicos clave	Kg vendidos por hembra al año (kg/HA)	Indicador macro de eficiencia de ciclo [10]
	Índice de Conversión Alimenticia (ICA/FCR)	2,4–3,5 kg alimento/kg ganancia [12]
	Ganancia Diaria de Peso (GDP/ADG)	750–1.100 g/día según fase [12]
	Porcentaje de Mortalidad global	3,6–5,6 % posdestete [19]
	Edad y Peso a la Venta	120–130 kg · 5–6 meses [12]
	Rentabilidad Económica	KPI integrador · costo/kg producido
Fase de Cría / Reproducción	% de Parición (Tasa de Partos)	> 90 % granjas de alto rendimiento [14]
	N.º Lechones Nacidos Totales	Progreso genético +0,32 lechones/camada/año [15]
	N.º Lechones Nacidos Vivos	> 14–15 lechones/camada [16]
	Lechones Destetados por Cerda al Año (LDHA/PWSY)	≥ 29,45 España · ≥ 30,16 UE [14]
	Paso al Destete (edad y peso)	21–28 días · 6–8 kg [11]
	Repeticiones	Señal de falla reproductiva[10]
	Partos por Hembra / Ciclo Productivo	Máx. teórico 2,57 partos/año
Fase de Precebo y Ceba	Ganancia Diaria de Peso (GDP) por fase	Precebo 400–600 g/día · Ceba 800–1.100 g/día [12]
	Índice de Conversión Alimenticia (ICA) por fase	Precebo 1,5–2,0 · Ceba 2,4–3,0 [13]
	Consumo de Alimento (Registros Diarios)	Señal temprana de problemas sanitarios [11]

Fuente: elaboración propia a partir del análisis temático y revisión bibliométrica (2025).

"La conversión alimenticia es el diferenciador de costos más agresivo. Una desviación mínima en la CA por estrés o mala nutrición compromete la estructura de costos, ya que el alimento es el rubro más oneroso de la operación."

(Entrevista, productor tecnificado, Oriente Antioqueño, 2025.)

En el dominio reproductivo, los expertos priorizaron el número de lechones nacidos vivos y la mortalidad predestete, reconociendo que el progreso genético en prolificidad ha creado nuevos retos operativos:

"Hoy nacen más lechones, pero hay que asegurarse de que sobrevivan y que su arranque sea adecuado; sin monitoreo del peso al nacer y la temperatura de la sala de partos, la selección genética puede convertirse en un problema en lugar de un avance."

(Entrevista, médico veterinario especialista, 2025.)

4.2 Parámetros Ambientales Identificados

En el dominio ambiental se identificaron tres subcategorías de variables: térmicas y de confort, gases tóxicos a monitorear y prácticas de manejo ambiental (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros ambientales críticos identificados y valores de referencia internacionales.

Subcategoría	Parámetro	Valor óptimo	Referencia	Nivel crítico / Umbral
Confort Térmico y Ventilación	Temperatura Ambiental Interior	17,4–23,2 °C (zona óptima)	[6]	> 28 °C estrés severo [20]
	Humedad Relativa	50–70 %	[9]	> 80 % riesgo sanitario
	Velocidad del Aire / Ventilación	0,2–0,5 m/s según etapa	[21]	< 0,1 m/s deficiente
	Flujo y Calidad del Agua	Ad libitum · agua fresca	[4]	Restricción: < 10% pérd. Peso
Gases Tóxicos a Monitorear	Amoníaco NH ₃	< 20 ppm	[7]; [8]	> 25 ppm irritación · > 80 ppm daño pulmonar
	Dióxido de Carbono CO ₂	< 3.000 ppm	[9]	> 6.000 ppm riesgo respiratorio
	Sulfuro de Hidrógeno H ₂ S	< 5 ppm (TWA 8 h)	[24]	> 100 ppm en agitación de purines
	Monóxido de Carbono CO	< 10 ppm	[38]	> 200 ppm peligroso
Manejo Ambiental	Control de Olores	Bioseguridad olfativa	[4]	Regulado por normativa ambiental
	Manejo de Desechos / Purines	Valorización porquinasa	[4]	Res. ICA 076509/2020
	Ubicación de la Granja	Distancia a otros predios	[4]	Bioseguridad sanitaria perimetral

Fuente: elaboración propia a partir de revisión bibliométrica (2025).

Los técnicos y veterinarios entrevistados enfatizaron el papel del NH₃ como 'inmunosupresor silencioso':

"Niveles elevados de amoníaco irritan las mucosas y simulan sintomatologías de enfermedades virales respiratorias toses y estornudos. Esto lleva al productor a un error costoso: medica con antibióticos un problema ambiental, incrementando gastos innecesarios y riesgos de resistencia bacteriana sin resolver la causa raíz."

(Entrevista, médico veterinaria especialista, 2025.)

Este hallazgo cualitativo coincide de forma precisa con la evidencia experimental de Wang et al. [8] y Buio et al. [7]. Respecto al CO₂, los participantes del grupo focal con mayor nivel de tecnificación reconocieron su relevancia como indicador proxy de la calidad de la ventilación, pero ningún productor de la categoría Comercial Industrial reportó monitoreo sistemático de este gas; brecha tecnológica que contrasta con el hallazgo de Laguna et al. [9], quienes lo identificaron como el mejor predictor individual de salud respiratoria.

4.3 Parámetros de Sanidad y Bienestar Animal

Los parámetros sanitarios con mayor consenso entre los participantes fueron: porcentaje de abortos, porcentaje de mortalidad de cerdas, porcentaje de momias, porcentaje de nacidos muertos y miligramos de antibiótico por kilogramo de peso producido. Este último fue señalado como un indicador de alta relevancia estratégica por su conexión con los estándares de inocuidad alimentaria y la resistencia antimicrobiana [4].

En el dominio del bienestar animal, los indicadores priorizados fueron: sistema de alojamiento (jaulas individuales vs. grupo vs. alojamiento libre), área asignada por animal, dimensiones de la jaula de gestación, sistema de alimentación (manual vs. automatizado) y tipo de ambiente (controlado vs. natural). La Tabla 3 resume los estándares de espacio recomendados por la Directiva Europea 2008/120/CE [36], adoptados como referencia por los especialistas entrevistados.

Tabla 3. Estándares mínimos de espacio por animal según peso vivo.

Peso vivo del cerdo	Espacio mínimo (m ² /animal)
Hasta 10 kg	0,15
10–20 kg	0,20
20–30 kg	0,30
30–50 kg	0,40
50–85 kg	0,55
85–110 kg	0,65
> 110 kg	1,00

Fuente: Consejo de la Unión Europea [36], citado en Chidgey [37].

4.4 Necesidades de Monitoreo Según Estrato Productivo

Uno de los hallazgos más relevantes del análisis cualitativo fue la identificación de necesidades diferenciales de monitoreo según el estrato productivo ICA (Tabla 4). Los grupos focales evidenciaron que una plataforma tecnológica de talla única no es adecuada para la diversidad del sector porcícola antioqueño.

Tabla 4. Parámetros prioritarios de monitoreo según estrato productivo ICA.

Estrato ICA	Prioridad principal	Parámetros clave identificados
Tecnificado	Evaluación económica integral	Rentabilidad, monitoreo ambiental (NH ₃), uso de software y análisis avanzado, optimización genética
Comercial Industrial (Foco del proyecto)	Toma de decisiones productivas	Revisión de conversiones y consumos, mortalidades y ganancias diarias, temperatura y NH ₃
Comercial Familiar	Productividad de hembras	Lechones nacidos/destetados, peso al destete y bajada a peso, ajuste de cargas (reemplazo)
Traspatio	Registros básicos	Historial y fichas de hembras, dificultad en manejo de información

Fuente: elaboración propia a partir del análisis temático (2025).

Para el estrato Comercial Industrial foco de este proyecto, los participantes identificaron como prioritarios: la revisión periódica de conversiones alimenticias y consumos por lote, el seguimiento de mortalidades y ganancias diarias, y la correlación entre parámetros ambientales (especialmente temperatura y NH₃) y el desempeño productivo. La ausencia de integración entre estos dominios fue señalada de forma unánime como la principal limitación operativa actual:

"Tenemos los datos de producción en un cuaderno, el termómetro en la pared y ninguna forma de conectar esas dos fuentes de información. Cuando algo sale mal, ya pasó; no tenemos cómo anticipar el problema."

(Entrevista, propietario de granja Comercial Industrial, Oriente Antioqueño, 2025.)

5. DISCUSIÓN

5.1 Relevancia del ICA como Parámetro Central

El consenso de los expertos sobre la centralidad del ICA coincide plenamente con la evidencia empírica internacional. El hallazgo de Guan et al. [12], que el ICA tiene la segunda correlación más alta ($r = -0,720$) con la eficiencia de engorde, apenas superado por la GDP valida la percepción de los productores colombianos de que la conversión alimenticia es el diferenciador de costos más agresivo. En el contexto colombiano, donde el alimento importado (maíz y soya) representa el 69 % de los costos de producción y el precio de estas materias primas es altamente volátil, una mejora de 0,1 en el ICA puede significar la diferencia entre rentabilidad y pérdida en una granja Comercial Industrial.

El monitoreo del ICA requiere un registro preciso del consumo de alimento frecuentemente ausente en los predios del estrato objetivo. El sistema IoT propuesto deberá contemplar, además de los sensores ambientales, mecanismos de registro o estimación del consumo a nivel de lote. Las tecnologías de alimentación de precisión revisadas por Navales et al. [13] demuestran que la reducción de la excreción de nitrógeno en al menos 11 % y la mejora del ICA son alcanzables con herramientas actualmente disponibles.

5.2 El Problema del Amoníaco como 'Inmunosupresor Invisible'

Uno de los hallazgos cualitativos de mayor relevancia es la identificación del NH_3 como causa de medicación incorrecta en granjas colombianas. Los productores entrevistados describieron con frecuencia episodios en los que los cerdos presentaban síntomas respiratorios ante los cuales se recurrió a antibióticos, sin resolver el problema ambiental subyacente. Esta dinámica fue documentada científicamente por Buio et al. [7] y Wang et al. [8]: concentraciones de NH_3 superiores a 20 ppm son suficientes para producir irritación de las vías respiratorias superiores, y la exposición crónica a 80 ppm genera daño pulmonar histológicamente verificable.

Este hallazgo tiene implicaciones directas para el diseño del sistema IoT: los sensores de NH_3 son el primer parámetro ambiental que debe monitorearse en tiempo real con alertas tempranas. El umbral de alerta propuesto (20–25 ppm) está respaldado por la literatura revisada y es técnicamente alcanzable con sensores MOS de bajo costo como los descritos por Parsiegel et al. [23]. Desde la perspectiva de salud pública y uso responsable de antimicrobianos, el monitoreo de NH_3 podría contribuir a reducir el indicador de miligramos de antibiótico por kilogramo de peso producido, que la Resolución ICA 076509 de 2020 identifica como parámetro trazable de inocuidad [4].

5.3 La Brecha Tecnológica entre Estratos y su Impacto en la Toma de Decisiones

Los resultados del grupo focal evidenciaron que la brecha tecnológica entre granjas Tecnificadas y Comerciales Industriales no es solo de hardware o conectividad, sino fundamentalmente de cultura de datos. Las granjas Tecnificadas utilizan software para control total de inventarios y subproductos, y reportan haber encontrado en la gestión de la 'porquinasa seca' una unidad de negocio adicional convirtiendo residuos en ingresos mediante su venta como fertilizante. Esta capacidad analítica está completamente ausente en el estrato Comercial Industrial, donde predominan registros manuales y la dependencia de la asistencia técnica de casas comerciales de alimento.

Un conflicto de interés sistémico identificado por los entrevistados consiste en que los técnicos de las casas comerciales actúan simultáneamente como asesores productivos y vendedores de insumos, lo que compromete la objetividad de los diagnósticos y las recomendaciones de manejo. La plataforma IoT-IA propuesta por el proyecto GIBA podría mitigar este riesgo al proveer datos objetivos sobre la relación entre la dieta administrada y el rendimiento productivo medido, habilitando al productor para exigir asesoría independiente y evaluar las recomendaciones técnicas con criterio propio. Este tipo de tensión entre datos propios y asesoría externa es consistente con las barreras de adopción de PLF identificadas por Akinyemi et al. (2023) en su análisis cualitativo de la industria porcina.

5.4 La Temperatura como Determinante del Rendimiento Animal en el Contexto Colombiano

El hallazgo de que el rango de confort térmico de los cerdos de engorde (17,4–23,2 °C) es infrecuentemente alcanzado en muchas granjas antioqueñas donde las temperaturas diurnas en el Oriente Antioqueño pueden superar los 25 °C en épocas de verano subraya la urgencia del monitoreo continuo de temperatura. Johnson y Cecil [20] estimaron en más de 520 millones de dólares las pérdidas anuales por estrés calórico solo en EE.UU.; aunque no existe estimación equivalente para Colombia, la magnitud del problema es comparable dada la similitud de las condiciones climáticas de las principales zonas porcícolas del país.

Un aporte metodológico significativo de este estudio es la identificación de que el CO_2 frecuentemente ignorado en el contexto colombiano merece incluirse en el conjunto mínimo de parámetros a monitorear. Laguna et al. [9], demostraron que el CO_2 mínimo es el mejor predictor individual de salud respiratoria ($R^2 = 0,862$), superando a la temperatura, NH_3 y H_2S en su capacidad predictiva. Su inclusión en el paquete tecnológico IoT es técnicamente viable y económicamente justificable dado el bajo costo de los sensores NDIR (Infrarrojos No Dispersivos) actuales.

5.5 Fortalezas, Limitaciones y Proyecciones

Entre las fortalezas metodológicas del estudio se destacan: la triangulación sistemática entre datos cualitativos de campo y evidencia bibliométrica de alto impacto, el diseño mixto que permitió validar la pertinencia local de benchmarks internacionales, y la participación directa de actores del sector porcícola colombiano como coinvestigadores. La elección del análisis temático de Braun y Clarke [1], validado específicamente para investigación cualitativa en ciencias pecuarias por Ritter et al. [33] y Vaarst et al. [39], garantiza la reproducibilidad y auditabilidad del proceso analítico.

Entre las limitaciones se identifican: el tamaño de la muestra cualitativa, que aunque apropiado para un estudio fenomenológico no permite generalizaciones estadísticas; la concentración geográfica en el Oriente Antioqueño, que puede no reflejar la diversidad de condiciones en otras subregiones del departamento; y la ausencia de validación cuantitativa de los parámetros identificados en condiciones de campo, prevista para las fases 2 y 3 del proyecto.

Los resultados de este estudio se traducirán directamente en la arquitectura del sistema de sensores IoT (Objetivo 2) y en las variables de entrada para los modelos de Inteligencia Artificial de la plataforma (Objetivo 3). La taxonomía de 47 parámetros también orienta el diseño de los tableros de control (*dashboards*) diferenciados por estrato productivo, que constituyen el corazón de la interfaz de usuario del paquete tecnológico.

6. CONCLUSIONES

Este estudio identificó y priorizó sistemáticamente 47 parámetros críticos para el monitoreo de granjas porcícolas Comerciales Industriales en Antioquia, organizados en cuatro categorías: zootécnicos/productivos, ambientales, sanitarios y de bienestar animal. La combinación de un enfoque metodológico cualitativo-mixto con una revisión exhaustiva de la literatura de alto impacto (2020–2025) produjo una taxonomía contextualmente válida y bibliométricamente respaldada.

Los parámetros con mayor consenso experto y mayor impacto documentado sobre la rentabilidad y sostenibilidad de las granjas son: kilogramos vendidos por hembra al año, índice de conversión alimenticia (ICA), temperatura ambiental interior, concentración de amoníaco (NH₃) y mortalidad por fase productiva. El ICA emerge como el parámetro con mayor potencial de mejora económica directa, mientras que el NH₃ es identificado como el parámetro ambiental con mayor riesgo de confundirse con causas sanitarias infecciosas, generando costos innecesarios por medicación antibiótica.

La identificación de necesidades diferenciadas de monitoreo según el estrato productivo ICA con prioridades distintas para granjas Tecnificadas, Comerciales Industriales, Comerciales Familiares y de Traspatio es un hallazgo clave para el diseño modular del paquete tecnológico, que deberá ofrecer interfaces y funcionalidades adaptadas a cada nivel de complejidad productiva.

Finalmente, la brecha tecnológica documentada entre el estrato Comercial Industrial que carece de herramientas de monitoreo integrado y los referentes internacionales de la industria, con plataformas PLF que integran 83 tecnologías disponibles comercialmente [27], evidencia la oportunidad y necesidad del paquete tecnológico IoT-IA propuesto por el Grupo GIBA. Los resultados de este Objetivo 1 constituyen el insumo técnico validado para las fases subsiguientes del proyecto: el desarrollo de sensores IoT (Objetivo 2) y la implementación de la plataforma de visualización con alertas tempranas basada en IA (Objetivo 3).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por el financiamiento del proyecto a través de la convocatoria interna 2025 de Menor Cuantía. Se agradece especialmente a los productores porcícolas, médicos veterinarios y zootecnistas del Oriente Antioqueño que participaron en las entrevistas y grupos focales, así como a los estudiantes del Semillero Ícaro de la Facultad de Ingenierías por su apoyo en la recolección de información.

APORTE DE CADA UNO DE LOS AUTORES

Oscar Hernán Velásquez-Arboleda: Planificación del estudio, diseño metodológico del estudio y análisis de resultados.

Ricardo Colmenares-Flórez: escritura y diseño metodológico del estudio.

Janeth Areiza-Gómez: aplicación de instrumentos con trabajo de campo y efectos de las variables en los cerdos.

José Daniel Aguirre-Hoyos: Análisis de variables identificadas e identificación de parámetros de medición.

REFERENCIAS

- [1] PorkColombia & Instituto Colombiano Agropecuario. (2025). Estadísticas del sector porcícola colombiano 2024–2025. PorkColombia. <https://www.porkcolombia.co>
- [2] Instituto Colombiano Agropecuario. (2025). Censos pecuarios nacionales 2024–2025. ICA. <https://www.ica.gov.co>
- [3] Instituto Colombiano Agropecuario. (2020). Resolución No. 076509 de 2020: Por medio de la cual se establecen los requisitos para obtener la certificación de las granjas porcícolas en buenas prácticas ganaderas. ICA. <https://www.ica.gov.co>

- [4] Colmenares-Flórez, R., Restrepo-Vélez, C., Areiza-Gómez, J., Velásquez-Arboleda, O. H., Mejía-Castrillón, J. C., & Correa-Torres, C. M. (2025). Informe de investigación Diseño de un paquete tecnológico validado basado en IoT e IA para la medición de parámetros productivos y ambientales en granjas comerciales industriales porcícolas [Documento de proyecto FIN01]. Grupo GIBA, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.
- [5] Rauw, W. M., Mayorga, E. J., Lei, S. M., Dekkers, J. C. M., Patience, J. F., Gabler, N. K., Lonergan, S. M., & Baumgard, L. H. (2020). Impact of environmental temperature on production traits in pigs. *Scientific Reports*, 10(1), Artículo 2721. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58981-w>
- [6] Buoi, E., Cialini, C., & Costa, A. (2023). Air quality assessment in pig farming: The Italian Classyfarm. *Animals*, 13(14), Artículo 2297. <https://doi.org/10.3390/ani13142297>
- [7] Wang, X., Wang, M., Chen, S., Zhang, Y., Liu, Q., Hu, L., & Zheng, T. (2020). Ammonia exposure causes lung injuries and disturbs pulmonary circadian clock gene network in a pig study. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 205, Artículo 111050. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111050>
- [8] Laguna, E. B., Mun, H. S., Ampode, K. M. B., Chem, V., Kim, Y. H., & Yang, C. J. (2024). Minimum carbon dioxide is a key predictor of the respiratory health of pigs in climate-controlled housing systems. *Porcine Health Management*, 10, Artículo 55. <https://doi.org/10.1186/s40813-024-00408-3>
- [9] Koketsu, Y., Tani, S., & Iida, R. (2020). Farm data analysis for lifetime performance components of sows and their predictors in breeding herds. *Porcine Health Management*, 6, Artículo 24. <https://doi.org/10.1186/s40813-020-00163-1>
- [10] Gormley, A., Jang, K. B., Garavito-Duarte, Y., Deng, Z., & Kim, S. W. (2024). Impacts of maternal nutrition on sow performance and potential positive effects on piglet performance. *Animals*, 14(13), Artículo 1858. <https://doi.org/10.3390/ani14131858>
- [11] Guan, R., Wu, J., Wang, Y., Chen, X., Zhang, W., & Yang, Y. (2023). Comparative analysis of productive performance and fattening efficiency of commercial pigs in China for two consecutive years. *Scientific Reports*, 13, Artículo 8154. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35430-y>
- [12] Navales, R. A. S., Tokach, M. D., DeRouchey, J. M., Woodworth, J. C., Goodband, R. D., & Dritz, S. S. (2025). Technologies and practices to improve feed and nutrient utilization by pigs. *Journal of Animal Science*, 103, Artículo skaf043. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf043>
- [13] Sanz-Fernández, S., Rodríguez-Hernández, P., Díaz-Gaona, C., Tusell, L., Quintanilla, R., & Rodríguez-Estévez, V. (2024). Evolution of sow productivity and evaluation parameters: Spanish farms as a benchmark. *Veterinary Sciences*, 11(12), Artículo 626. <https://doi.org/10.3390/vetsci11120626>
- [14] Knol, E. F., & Neeteson-van Nieuwenhoven, A.-M. (2023). Genetic and phenotypic time trends of litter size, piglet mortality, and birth weight in pigs. *Frontiers in Animal Science*, 4, Artículo 1218175. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1218175>
- [15] Boonkum, W., Permethongchoochai, S., Chankitisakul, V., & Duangjinda, M. (2025). Genetic strategies for enhancing litter size and birth weight uniformity in piglets. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, Artículo 1512701. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1512701>
- [16] Will, K. J., Magalhães, E. S., Moura, C. A. A., Trevisan, G., Silva, G. S., Mellagi, A. P. G., Ulguim, R. R., Bortolozzo, F. P., & Linhares, D. C. L. (2024). Risk factors associated with piglet pre-weaning mortality in a Midwestern U.S. swine production system from 2020 to 2022. *Preventive Veterinary Medicine*, 232, Artículo 106316. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106316>
- [17] Paiva, R. C., Moura, C. A., Thomas, P., Haberl, B., Greiner, L., Rademacher, C. J., Silva, A. P. S. P., Trevisan, G., Linhares, D. C. L., & Silva, G. S. (2023). Risk factors associated with sow mortality in breeding herds under one production system in the Midwestern United States. *Preventive Veterinary Medicine*, 213, Artículo 105883. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2023.105883>
- [18] Gebhardt, J. T., Tokach, M. D., Dritz, S. S., DeRouchey, J. M., Woodworth, J. C., Goodband, R. D., & Henry, S. C. (2020). Postweaning mortality in commercial swine production. I: Review of non-infectious contributing factors. *Translational Animal Science*, 4(2), 462–484. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa068>
- [19] Johnson, J. S., & Cecil, C. F. (2025). Heat stress matters: Insights from United States swine producers. *Translational Animal Science*, 9(1), Artículo txaf001. <https://doi.org/10.1093/tas/txaf001>
- [20] Hu, Z., Yang, Q., Tao, Y., Shi, L., Tu, J., & Wang, Y. (2023). A review of ventilation and cooling systems for large-scale pig farms. *Sustainable Cities and Society*, 89, Artículo 104372. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104372>
- [21] Peng, S., Zhu, J., Liu, Z., Hu, B., Wang, M., & Pu, S. (2023). Prediction of ammonia concentration in a pig house based on machine learning models and environmental parameters. *Animals*, 13(1), Artículo 165. <https://doi.org/10.3390/ani13010165>
- [22] Parsiegel, R., Budag Becker, M., Gollnow, K., Freitag, C., Pöschel, K., & Hornig, G. (2025). Virtual MOS sensor array design for ammonia monitoring in pig barns. *Sensors*, 25(8), Artículo 2617. <https://doi.org/10.3390/s25082617>

- [23] Park, J., Kang, T., Heo, Y., Lee, K., Kim, K., Lee, K., & Yoon, C. (2020). Evaluation of short-term exposure levels on ammonia and hydrogen sulfide during manure-handling processes at livestock farms. *Safety and Health at Work*, 11(1), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2019.12.007>
- [24] Pessoa, J., Camp Montoro, J., Pina Nunes, T., Norton, T., McAloon, C., Garcia Manzanilla, E., & Boyle, L. (2022). Environmental risk factors influence the frequency of coughing and sneezing episodes in finisher pigs on a farm free of respiratory disease. *Animals*, 12(8), Artículo 982. <https://doi.org/10.3390/ani12080982>
- [25] Congreso de la República de Colombia. (2016). Ley 1774 de 2016: Por medio de la cual se modifican el Código Civil, la Ley 84 de 1989, el Código Penal, el Código de Procedimiento Penal y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial*, (49747). <https://www.secretariassenado.gov.co>
- [26] Stygar, A. H., Gómez, Y., Berteselli, G. V., Costa, E. D., Canali, E., Niemi, J. K., Llonch, P., & Pastell, M. (2021). A systematic review on validated precision livestock farming technologies for pig production and its potential to assess animal welfare. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, Artículo 660565. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.660565>
- [27] Larsen, M. L. V., Wang, M., & Norton, T. (2021). Information technologies for welfare monitoring in pigs and their relation to Welfare Quality®. *Sustainability*, 13(2), Artículo 692. <https://doi.org/10.3390/su13020692>
- [28] Rubio Fuentes, M., Rubio Cifuentes, G. A., Ramírez Restrepo, S. A., & Arroyave Tobón, S. A. (2025). Implementation of an IoT-based livestock monitoring system using Mioty technology. *Internet Technology Letters*, 8(1), Artículo e70141. <https://doi.org/10.1002/itl2.70141>
- [29] Wang, S., Jiang, H., Qiao, Y., Jiang, S., Lin, H., & Sun, Q. (2022). The research progress of vision-based artificial intelligence in smart pig farming. *Sensors*, 22(17), Artículo 6541. <https://doi.org/10.3390/s22176541>
- [30] Mateo-Fornes, M., Gimeno-Blanes, F. J., García-Sánchez, A. J., & García-Haro, J. (2025). IoT system for monitoring breeding sows in swine farms. *IEEE Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2025.3526358>
- [31] Akinyemi, B. E., Vigors, B., Turner, S. P., Roehe, R., D'Eath, R. B., & Lawrence, A. B. (2023). Precision livestock farming: A qualitative exploration of swine industry stakeholders. *Frontiers in Animal Science*, 4, Artículo 1150528. <https://doi.org/10.3389/fanim.2023.1150528>
- [32] Ritter, C., Koralesky, K. E., Saraceni, J., Roche, S., Vaarst, M., & Kelton, D. (2023). Invited review: Qualitative research in dairy science—A narrative review. *Journal of Dairy Science*, 106(9), 5880–5895. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23125>
- [33] Ministerio de Salud de Colombia. (1993). Resolución 8430 de 1993: Por la cual se establecen las normas científicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud. Ministerio de Salud. <https://www.minsalud.gov.co>
- [34] Congreso de la República de Colombia. (2012). Ley 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales. *Diario Oficial*, (48587). <https://www.funcionpublica.gov.co>
- [35] Consejo de la Unión Europea. (2009). Directiva 2008/120/CE del Consejo, de 18 de diciembre de 2008, relativa a las normas mínimas para la protección de cerdos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 47, 5–13. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX:32008L0120>
- [36] Chidgey, K. L. (2024). Review: Space allowance for growing pigs: Animal welfare, performance and on-farm practicality. *Animal*, 18(Supl. 1), Artículo 100890. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100890>
- [37] Occupational Safety and Health Administration. (s.f.). Carbon monoxide. U.S. Department of Labor. <https://www.osha.gov/carbon-monoxide>
- [38] Vaarst, M., Ritter, C., Saraceni, J., Roche, S., Koralesky, K. E., & Kelton, D. F. (2024). Invited review: Qualitative social and human science research focusing on actors in and around dairy farming. *Journal of Dairy Science*, 107(12), 10050–10065. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-25329>