



ESCUELA DE DOCTORADO
INTERNACIONAL DE LA USC

Eugenio
Losada Vázquez

Tesis doctoral

EL BIENESTAR ANIMAL
COMO BASE DEL CONTROL
AMBIENTAL PARA LA
EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
PRODUCTIVA EN
EXPLOTACIONES PORCINAS
DE TRANSICIÓN

Lugo, 2022



TESIS DE DOCTORADO

**EL BIENESTAR ANIMAL COMO
BASE DEL CONTROL
AMBIENTAL PARA LA
EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
PRODUCTIVA EN
EXPLOTACIONES PORCINAS
DE TRANSICIÓN**

Eugenio Losada Vázquez

**ESCUELA DE DOCTORADO INTERNACIONAL DE LA UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE
COMPOSTELA**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO RURAL E
CIVIL**



LUGO

2022

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES DE LA TESIS

**EL BIENESTAR ANIMAL COMO BASE DEL CONTROL AMBIENTAL
PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA EN
EXPLOTACIONES PORCINAS DE TRANSICIÓN**

D./D^a. **María Dolores FernándezRodríguez**

D./D^a. **Manuel Ramiro Rodríguez Rodríguez**

INFORMA/N:

Que la presente tesis, se corresponde con el trabajo realizado por D. Eugenio Losada Vázquez, bajo nuestra dirección, y autorizamos su presentación, considerando que reúne los requisitos exigidos en el Reglamento de Estudios de Doctorado de la USC, y que como directores de esta no incurre en las causas de abstención establecidas en la Ley 40/2015.

De acuerdo con lo indicado en el Reglamento de Estudios de Doctorado, declaramos también que la presente tesis doctoral es idónea para ser defendida en base a la modalidad de COMPENDIO DE PUBLICACIONES, en los que la participación del doctorando fue decisiva para su elaboración y las publicaciones se ajustan al Plan de Investigación.

En Lugo, 2 de noviembre de 2022

D./Dña. EUGENIO LOSADA VÁZQUEZ

Título de la tesis: EL BIENESTAR ANIMAL COMO BASE DEL CONTROL AMBIENTAL PARA LA EFICIENCIA ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA EN EXPLOTACIONES PORCINAS DE TRANSICIÓN

Presento mi tesis, siguiendo el procedimiento adecuado al Reglamento y declaro que:

- 1) La tesis abarca los resultados de la elaboración de mi trabajo.
- 2) De ser el caso, en la tesis se hace referencia a las colaboraciones que tuvo este trabajo.
- 3) Confirmando que la tesis no incurre en ningún tipo de plagio de otros autores ni de trabajos presentados por mí para la obtención de otros títulos.
- 4) La tesis es la versión definitiva presentada para su defensa y coincide la versión impresa con la presentada en formato electrónico.

Y me comprometo a presentar el Compromiso Documental de Supervisión en el caso que el original no esté depositado en la Escuela.

En Lugo, 17 de noviembre de 2022.

Firma electrónica

AGRADECIMIENTOS

Nesta vida, cando se comeza calquera proxecto sempre se chega a un final, final que pode satisfacer os obxectivos fixados nun principio ou non, moitas veces, como é o caso, a consecución dos obxectivos depende da xente que camiña ao teu carón, se eres quen de ir ben acompañado todo adoita ser mais sinxelo ou polo menos posible, este é o meu caso na presente Tese Doutoral, se ademais tés a sorte de que te leven da man e aqueles que te acompañan teñen unha calidade humana e profesional capaz de superar calquera desacougo, como son as dúas persoas as que lle teño que agradecer, os doutores María Dolores Fernández Rodríguez, Dolores (muller loitadora), e Manuel Ramiro Rodríguez Rodríguez, Ro-Ro (home bo e xeneroso) todo resulta moito mais doado.

Non podo pasar sen agradecerlle de especial xeito a redacción da presente a Ro-Ro, auténtico Pigmalión desta Tese, sen o seu apoio este barco xamais chegaría a porto, e como en tantas outras ocasións na miña vida continuaría navegando sen rumbo ata caer no esquecemento.

Cando un traballo o realiza un equipo o resultado nunca é propiedade dunha soa persoa, senón que se debe a xenerosidade de todos aqueles que dun xeito ou outro colaboraron nel, grazas a todos aqueles que formaron parte da elaboración da presente, pola súa xenerosidade.

Houbo moita xente que me animou neste proceso pero quixera nomear a Pedro, sempre soubo como motivarme, sempre estivo disposto a empuxar este carro.

Non quero pasar sen nomear nestas liñas a miña familia que sempre me apoiou en todo, sempre me animaron e me entenderon, incluso nos momentos de desazón, grazas a Pepe, a Ofe, a Loly e Jorge, a Jose e Teresa e grazas tamén as miñas compañeiras de viaxe Belén e Suni, comezo a sospeitar que ningún deles coñece a palabra “non”, polo menos cando lle pides algo deben tela borrada do seu dicionario.

Son plenamente consciente que sen o apoio, e o esforzo de todos e cada un dos que acabo de nomear neste momento non estaría escribindo estas liñas.

De todas maneiras, dun xeito ou outro eles son sabedores do meu agradecemento, e parafraseando a Ernesto Guevara escribo: “...tería moitas cousas que dicirlles, pero sinto que son innecesarias, as palabras non poden expresar o que eu quixera e non vale a pena emborronar cuartillas”.

PREFACIO

La presente Tesis Doctoral, presentada bajo la modalidad de compilación de publicaciones, resume el trabajo de investigación realizado por el equipo de investigadores citados a continuación como coautores en cada uno de los artículos. Se basa fundamentalmente, en los análisis de los resultados obtenidos durante la investigación que asimismo dio lugar a la publicación de distintos artículos, monografías y un capítulo de un libro.

Los 3 artículos que fundamentan la base de la presente Tesis Doctoral están todos publicados en revistas indexadas, las cuales se enumeran en las páginas siguientes, así como el factor de impacto de cada una de ellas y las citas de esos artículos en otros posteriores. Además de los datos y análisis de estos 3 artículos, se incluye una descripción de los materiales y métodos empleados en la investigación, una discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones que se pueden inferir de la misma.

Los artículos que constituyen la base de la redacción de la presente Tesis Doctoral son:

PUBLICACIONES:

ARTÍCULO 1

Artículo: *Energy, Production and Environmental Characteristics of a Conventional Weaned Piglet Farm in North West Spain*

Autores: Maria D. Fernandez, Eugenio Losada, Juan A. Ortega, Tamara Arango, María José Ginzo-Villamayor, Roberto Besteiro, Santiago Lamosa, Martín Barrasa y Manuel R. Rodriguez

Publicación: *Agronomy* (2020); 10(6), 902

ISSN: 2073-4395

DOI: [10.3390/agronomy10060902](https://doi.org/10.3390/agronomy10060902)

Factor de Impacto: 3.417 (2020)

Posición en la categoría: 16/91 (*Agronomy*)

Cuartil en la categoría: Q1

Contribución del autor de la tesis: Revisión bibliográfica; metodología: tratamiento de datos; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

Número de citas (Web of science): 5 (2022/11/15)

ARTÍCULO 2

Artículo: *Validation of an Autoregressive Integrated Moving Average Model for the Prediction of Animal Zone Temperature in a Weaned Piglet Building*

Autores: Juan A. Ortega, Eugenio Losada, Roberto Besteiro, Tamara Arango, Maria J. Ginzo-Villamayor, Ramon Velo, Maria D. Fernandez, Manuel R. Rodriguez

Publicación: *Biosystems Engineering*, 174 (2018); 231-238



ISSN: 1537-5110

DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012)

Factor de impacto: 2.983 (2018)

Posición en la categoría: 7/58 (Agriculture, Multidisciplinary)

Cuartil en la categoría: Q1

Número de citas (Web of science): 7 (2022/11/15)

Contribución del autor de la tesis: Metodología: tratamiento de datos para la mejora del modelo con inclusión de nuevas variables y validación del mismo; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

ARTÍCULO 3

Artículo: *Evolution of NH3 concentrations in weaner pig buildings based on setpoint temperature*

Autores: Manuel R. Rodriguez, Eugenio Losada, Roberto Besteiro, Tamara Arango, Ramon Velo, Juan A. Ortega and Maria D. Fernandez

Publicación: Agronomy (2020); 10(1), 107

ISSN: 2073-4395

DOI: [10.3390/agronomy10010107](https://doi.org/10.3390/agronomy10010107)

Factor de Impacto: 3.417 (2020)

Posición en la categoría: 16/91 (Agronomy)

Cuartil en la categoría: Q1

Número de citas (Web of science): 9 (2022/11/15)

Contribución del autor da tesis: Revisión bibliográfica; metodología: tratamiento de datos y modelización; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

RESUMEN

El bienestar animal, como base para el manejo de los animales en explotaciones porcinas intensivas, ha experimentado un notable desarrollo en los últimos años. Esto, junto con una producción más respetuosa con el medio ambiente, son los grandes retos a los que se enfrenta la producción porcina en la actualidad.

En este trabajo se pretende incluir el bienestar animal como parámetro del control ambiental para la mejora de la eficiencia energética y productiva. Para ello, se han evaluado las características energéticas, productivas y ambientales de una granja convencional con control ambiental basado en la temperatura. Las variables ambientales medidas, en la zona ocupada por los animales, fueron la temperatura, humedad relativa, concentraciones de CO₂ y NH₃ y velocidad del aire. Además, se midieron la energía consumida por las instalaciones de calefacción y de ventilación y la temperatura exterior. Las variables seleccionadas se midieron en granja, en una zona de alta densidad ganadera del NW de España.

La gestión mejorada de la humedad resultó en una reducción del 17 % de la energía consumida, lo que implicó ahorros energéticos comprendidos entre el 33 % y el 47 % por kg producido. En consecuencia, agregar la humedad como variable de control podría resultar en tasas de ventilación más altas, mejorando así el bienestar animal, reduciendo el uso de energía de calefacción y aumentando la ganancia de peso por unidad de energía de control climático. Las fuertes correlaciones existentes entre la energía de calefacción y la humedad relativa y entre la energía de ventilación y la concentración de CO₂ sugieren que estas variables podrían estimarse fácilmente sin costos de sensores adicionales.

Por ser la variable predominante en las instalaciones de control por su simplicidad y bajo coste y los efectos que tiene sobre el crecimiento y desarrollo de los animales, se realizó una especial evaluación de la variable ambiental temperatura. Como resultado se validó un modelo ARIMA para la predicción de la temperatura en la zona animal. El modelo mostró buena precisión y fiabilidad por lo que se puede utilizar para sistemas de control ambiental más efectivos que sean capaces de anticipar eventos y mostrar una mejor respuesta, lo que ayuda a mejorar el ahorro de energía y el bienestar animal.

Por otra parte, no es frecuente el empleo de la concentración de amoníaco para el control ambiental en este tipo de alojamientos, a pesar de su impacto en el medio ambiente, el bienestar animal y la salud de los trabajadores. Por ello, en este trabajo se determinaron los efectos de la temperatura de consigna para el control ambiental en la evolución diaria de la concentración de NH₃ en la zona ocupada por animales. Como resultado, se proponen ecuaciones susceptibles de ser implementadas en controladores convencionales para el control ambiental en tiempo real, con lo que se van a mejorar el bienestar y la productividad de los animales.

RESUMO

O benestar animal, como base para o manexo dos animais en explotacións porcinas intensivas, experimentou un notable desenvolvemento nos últimos anos. Isto, xunto cunha produción máis respectuosa co medio ambiente, son os grandes retos a os que se enfrenta a produción porcina na actualidade.

Neste traballo preténdese incluír o benestar animal como parámetro do control ambiental para a mellora da eficiencia enerxética e produtiva. Para elo, avaliáronse as características enerxéticas, produtivas e ambientais dunha granxa convencional con control ambiental baseado na temperatura. As variables ambientais medidas, na zona ocupada polos animais, foron a temperatura, humidade relativa, concentracións de CO₂ e NH₃ e velocidade do aire. Ademais, medíronse a enerxía consumida polas instalacións de calefacción e de ventilación e a temperatura exterior. As variables seleccionadas medíronse en granxa, nunha zona de alta densidade gandeira do NW de España.

A xestión mellorada da humidade resultou nunha redución do 17 % da enerxía consumida, o que implicou aforros enerxéticos comprendidos entre o 33 % e o 47 % por kg producido. En consecuencia, agregar a humidade como variable de control podería resultar en taxas de ventilación máis altas, mellorando así o benestar animal, reducindo o uso de enerxía de calefacción e aumentando a ganancia de peso por unidade de enerxía de control climático. As fortes correlacións existentes entre a enerxía de calefacción e a humidade relativa e entre a enerxía de ventilación e a concentración de CO₂ suxiren que estas variables poderían estimarse facilmente sen custos de sensores adicionais.

Por ser a variable predominante nas instalacións de control pola súa simplicidade e baixo custe e os efectos que ten sobre o crecemento e desenvolvemento dos animais, realizouse unha especial avaliación da variable ambiental temperatura. Como resultado validouse un modelo ARIMA para a predición da temperatura na zona animal. O modelo mostrou boa precisión e fiabilidade polo que se pode utilizar para sistemas de control ambiental máis efectivos que sexan capaces de anticipar eventos e amosar unha mellor resposta, o que axuda a mellorar o aforro de enerxía e o benestar animal.

Por outra banda, non é frecuente o emprego da concentración de amoníaco para o control ambiental neste tipo de aloxamentos, a pesares do seu impacto no medio ambiente, o benestar animal e a saúde dos traballadores. Por isto, neste traballo determináronse os efectos da temperatura de consigna para o control ambiental na evolución diaria da concentración de NH₃ na zona ocupada por animais. Como resultado, propóñense ecuacións susceptibles de ser implementadas en controladores convencionais para o control ambiental en tempo real, co que se van mellorar o benestar e a produtividade dos animais.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INDICADORES DEL SECTOR.....	1
1.1.1 Sector porcino en España.....	2
1.1.2 Sector porcino en Galicia.....	3
1.1.3 El sector porcino en España respecto al resto de países.....	5
1.2 VARIABLES AMBIENTALES EN EXPLOTACIONES DE GANADO PORCINO DE TRANSICIÓN.....	6
1.3 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL EN EXPLOTACIONES DE GANADO PORCINO.....	8
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.....	11
3. METODOLOGÍA.....	13
3.1 ENSAYO EXPERIMENTAL.....	13
3.2 MEDICIÓN Y DETERMINACIÓN DE VARIABLES.....	14
3.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA EMPLEADA PARA CARACTERIZACIÓN PRODUCTIVA, ENERGÉTICA Y AMBIENTAL A LO LARGO DE LOS CICLOS ANALIZADOS.....	16
3.4 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA VALIDACIÓN DEL MODELO ARIMA DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL.....	17
3.4.1 Modelo.....	17
3.4.2 Análisis estadístico.....	18
3.5 METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO SENOIDAL DE LA CONCENTRACIÓN DE AMONÍACO A DISTINTAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA.....	18
3.5.1 Análisis matemático:.....	19
4. DISCUSIÓN GENERAL.....	21
4.1. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS, PRODUCTIVAS Y AMBIENTALES DE UNA GRANJA DE PRODUCCIÓN DE LECHONES DESTETADOS EN EL NOROESTE DE ESPAÑA.....	23
4.2. VALIDACIÓN DE UN MODELO ARIMA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL EN UNA EXPLOTACIÓN PORCINA DE LECHONES DESTETADOS.....	28
4.3. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NH ₃ EN NAVES DE LECHONES DESTETADOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE CONSIGNA.....	29
5. CONCLUSIONES.....	35
6. REFERENCIAS.....	37

ANEXO I:

ARTÍCULOS PUBLICADOS

1. INTRODUCCIÓN

El sector ganadero en general y el porcino en particular son sectores dinámicos, en continua evolución, adaptándose a los distintos cambios que determinan los mercados, la legislación y los avances tecnológicos.

La continua evolución de la población mundial junto con la globalización dio lugar a una mayor demanda de alimentos, en concreto carne de cerdo, generando de este modo un nicho productivo que está siendo aprovechado por explotaciones antiguas que se adaptan a los modernos sistemas y nuevas explotaciones.

En Galicia tradicionalmente el sector del porcino se dedicaba al autoconsumo con pequeñas cantidades destinadas a la venta, con la aparición de las primeras fábricas de pienso sobre la mitad del siglo XX y las primeras empresas integradoras esta concepción productiva evolucionó hacia el abastecimiento del mercado interior y de proximidad. Con los avances tecnológicos y el cambio de visión productiva se fue pasando progresivamente de una economía complementaria a la producción láctea, a un sistema de producción que se imponía como el principal en las explotaciones ganaderas. Gran parte de esta evolución se debió a la baja necesidad de terreno para la producción de porcino (ganadería sin tierra). En los últimos años y debido a la mayor sensibilización ecológica y respeto por el medio ambiente, así como por el bienestar de los animales, este concepto comienza a mudar y se empiezan a tener más en cuenta los impactos ambientales generados por los residuos (sobre todo purines), así como por la emisión de gases, derivados de la propia actividad animal, como de las necesidades productivas (principalmente calefacción). Además, es preciso tener en cuenta las condiciones de habitabilidad requeridas para que el animal, durante el período productivo, se encuentre en condiciones idóneas de bienestar, actuando sobre las densidades en granjas y el control ambiental de las mismas.

En resumen, en Galicia, en el sector porcino, se pasó de una economía de autoconsumo a otra productiva complementaria de la principal (láctea), hasta llegar a una **producción industrial donde los distintos parámetros ambientales, de bienestar animal o de generación de residuos han de ser controlados.**

1.1 INDICADORES DEL SECTOR

Uno de los retos que se le plantea al sector ganadero y por tanto, a los distintos estamentos que lo componen, productores, distribuidores, integradoras, técnicos, etc., es contribuir a la alimentación de una población mundial en constante crecimiento que, según Naciones Unidas, puede pasar de los 7.700 millones actuales a los 9.700 en 30 años, es decir en el entorno del año 2050. No se consideran estimaciones a más largo plazo, aunque pronostican una continuidad en la línea de crecimiento poblacional.

Si a esto le unimos la tendencia a la globalización mundial, con la internacionalización de los mercados y la facilidad para el transporte, tanto de animales como de canales de carne, nos veremos ante un futuro con una mayor demanda mundial de carne, independiente del lugar de producción, decidiéndose éste por la mayor adecuación, mayor implante tecnológico y menores costes productivos.

1.1.1 Sector porcino en España

El sector porcino español tiene una importancia clave en la economía de nuestro país ya que supone en torno al 16% (15,7% en el año 2021), de la Producción Final Agraria. Dentro de las producciones ganaderas, el sector porcino ocupa el primer lugar en cuanto a su importancia económica alcanzando el 42,4% de la Producción Final Ganadera (Fuente: SG. Análisis, Coordinación y Estadística, MAPA).

A nivel mundial, la UE-28 es el segundo productor de carne de porcino, después de China. Individualmente, España es la cuarta potencia productora (después de China, EEUU, y Alemania), mientras que, a nivel europeo, España ocupa el segundo en producción con un 19,5% de las toneladas producidas (datos 2019, Fuente: EUROSTAT y SG Análisis, Coordinación y Estadística, MAPA), por detrás de Alemania, y es el primer país de la UE en censo desde que en 2015 superó a Alemania en población porcina, con el 21,1% del censo comunitario, con ligeros incrementos anuales de este porcentaje (Fuente: EUROSTAT y SG Análisis, Coordinación y Estadística, MAPA).

Durante los últimos años el sector porcino ha crecido notablemente, tanto en producción, como en censos y en número de explotaciones, gracias al empuje de los mercados exteriores apoyado, a su vez, en la competitividad del sector en el mercado mundial.

Este aumento de la producción ha incrementado la ya elevada tasa de autoabastecimiento, el 170,9 % en el año 2018 (Fuente: SG de Análisis, Coordinación y Estadística, Datacomex-AEAT, INE) lo que convierte a la exportación en un elemento esencial para el equilibrio del mercado. Con una balanza comercial muy positiva, España se ha consolidado como segundo mayor exportador de porcino de la UE, solo por detrás de Alemania, aumentando espectacularmente las exportaciones a terceros países, especialmente a China, debido en parte a la peste porcina africana (PPA) y otros países del Sudeste asiático (figs. 1 y 2).

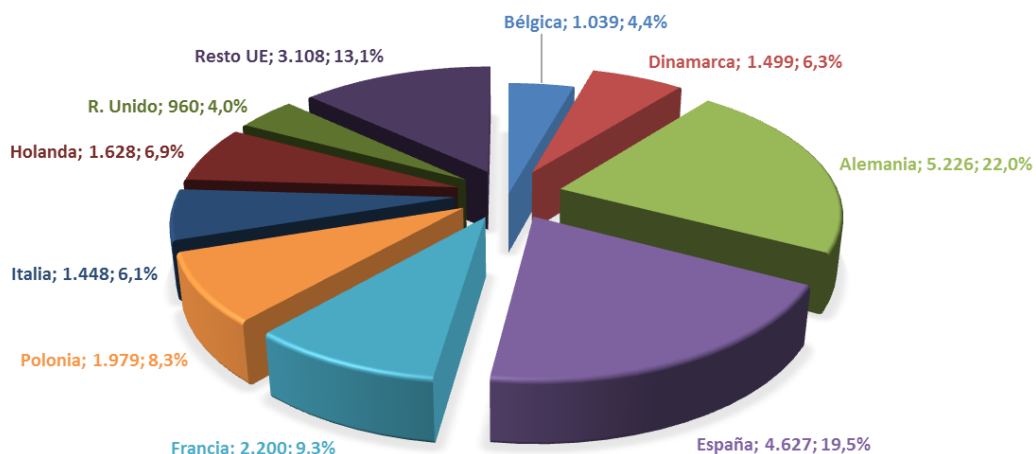


Figura 1. Producción de carne de cerdo en la UE durante el año 2019. Fuente: DATACOMEX, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). 2020 Reproducción autorizada indicando publicación y fecha.

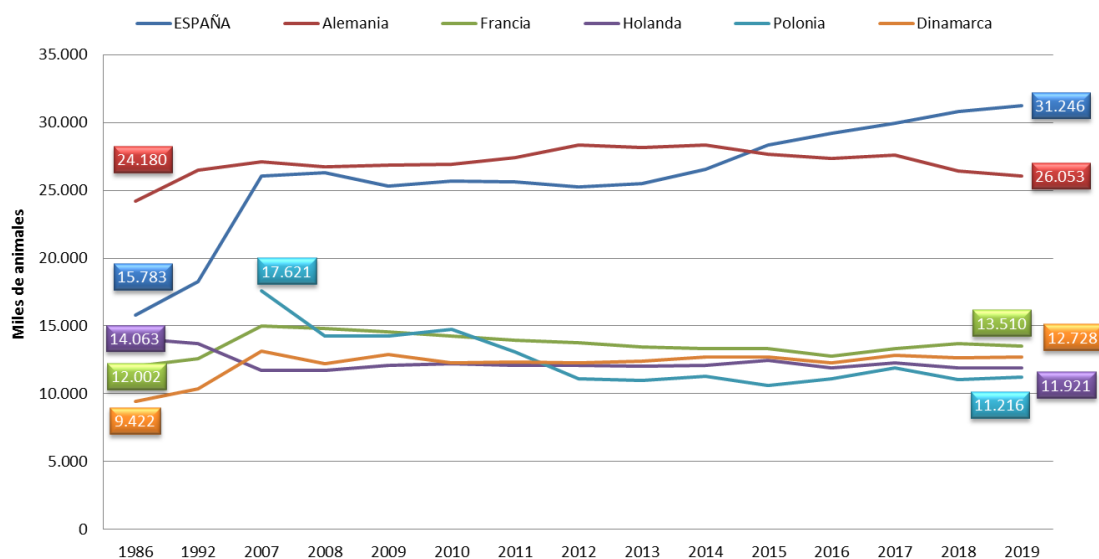


Figura 2. Evolución del censo porcino de la UE. Fuente: DATACOMEX, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). 2020 Reproducción autorizada indicando publicación y fecha.

Como se puede observar en los gráficos adjuntos, el censo de animales ha crecido en todas las categorías, incrementando el peso del sector dentro de la UE, siendo España la zona de Europa donde mayor incremento se ha notado. Esto se puede extrapolar a las distintas comunidades autónomas, si bien durante 2019, entre las grandes productoras, ha destacado el incremento de censo en **Galicia (+12,5%)**, Castilla y León (+2,9%), Cataluña (+1,7%) y Aragón (+1,5%).

En cuanto al número de granjas o explotaciones, el sector ha sufrido una profunda reestructuración reduciéndose de manera tangible, pasando en los últimos años de 99.561 explotaciones a 92.758. Si a esto le unimos que el censo ganadero aumentó, prácticamente duplicándose en ese mismo período, se puede concluir que la tendencia es a la desaparición de las explotaciones más reducidas modificándose la producción hacia granjas más intensivas. Ello es posible **gracias a las posibilidades que ofrece la mejora genética junto con las nuevas tecnologías, sobre todo de control ambiental y automatización**, lo que posibilita, por un lado, aumentar la producción y, por otro, reducir los costes productivos, con una mejora de las condiciones ambientales y un menor coste de la mano de obra, respetando las condiciones de bienestar ambiental y cuidado del medio ambiente.

1.1.2 Sector porcino en Galicia

El sector del porcino en Galicia presenta grandes similitudes con el sector nacional, pero al tiempo tiene una serie de peculiaridades significativas, representativas de la evolución en el tiempo. Estas peculiaridades pueden marcar las líneas de progresión del sector, adaptándose a las nuevas situaciones, tanto de implantación de nuevas tecnologías, como de control ambiental, condiciones de los animales y respeto con el medio ambiente.

Todos estos condicionantes llevan aparejado un **estudio de las condiciones de las explotaciones, tanto de las de nueva creación, como de las existentes y en buen grado de las condiciones ambientales y energéticas** a fin de adaptarse a las condiciones productivas de la UE y la mejora de rendimiento ganadero con el abaratamiento de costes que ello podría implicar.

Como se indicó, el sector porcino va cobrando importancia económica en Galicia, situándose en la actualidad como uno de los principales de la producción ganadera. A nivel nacional, esa importancia queda patente por el número de explotaciones presentes, conforme a los datos del año 2019, donde se puede apreciar que a nivel nacional el número de explotaciones presentes en Galicia representa la tercera parte de las explotaciones a nivel nacional (fig. 3).

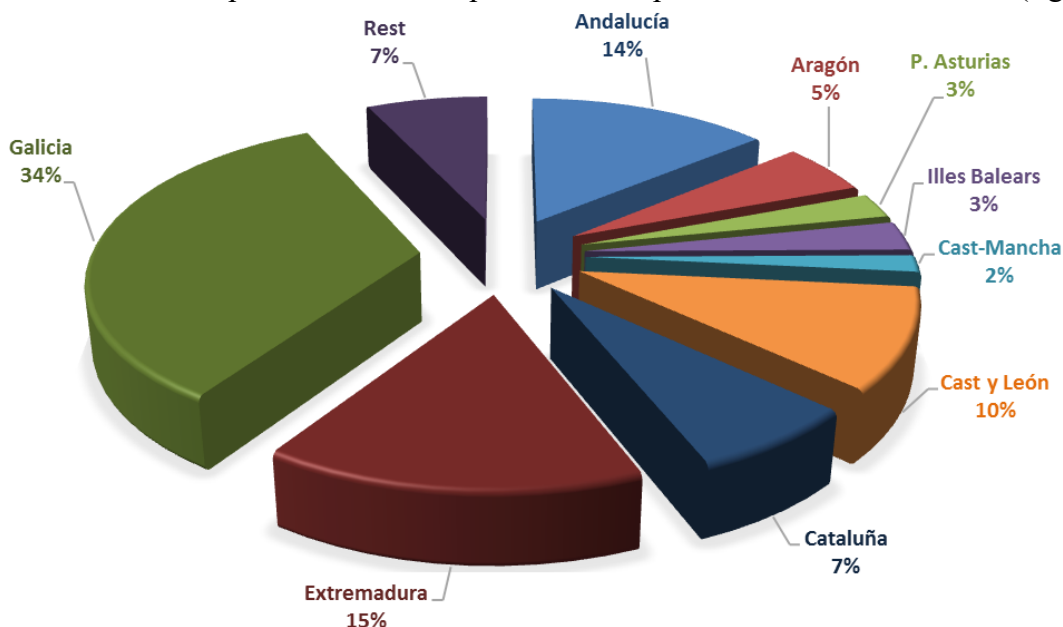


Figura 3. Distribución del nº total de explotaciones de ganado porcino por comunidades autónomas en al año 2020. Fuente: DATACOMEX, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT).2020 Reproducción autorizada indicando publicación y fecha.

No obstante, y esta es una de las peculiaridades más significativas del sector productivo en Galicia, ese elevado peso en el número de explotaciones no se traduce directamente en un mayor censo de porcino en la comunidad, es decir, a pesar del elevado número de explotaciones, éstas resultan de un tamaño inferior a la media (fig. 4), pudiéndose comprobar que un 34% de las explotaciones suponen un 4% del censo ganadero, siendo además en Galicia la práctica totalidad de las explotaciones de sistema productivo intensivo. Esto es debido fundamentalmente al pequeño tamaño de las explotaciones, factor que suele ir ligado a menor automatización y controles ambiental y energético. Son explotaciones familiares de escasa implantación tecnológica.

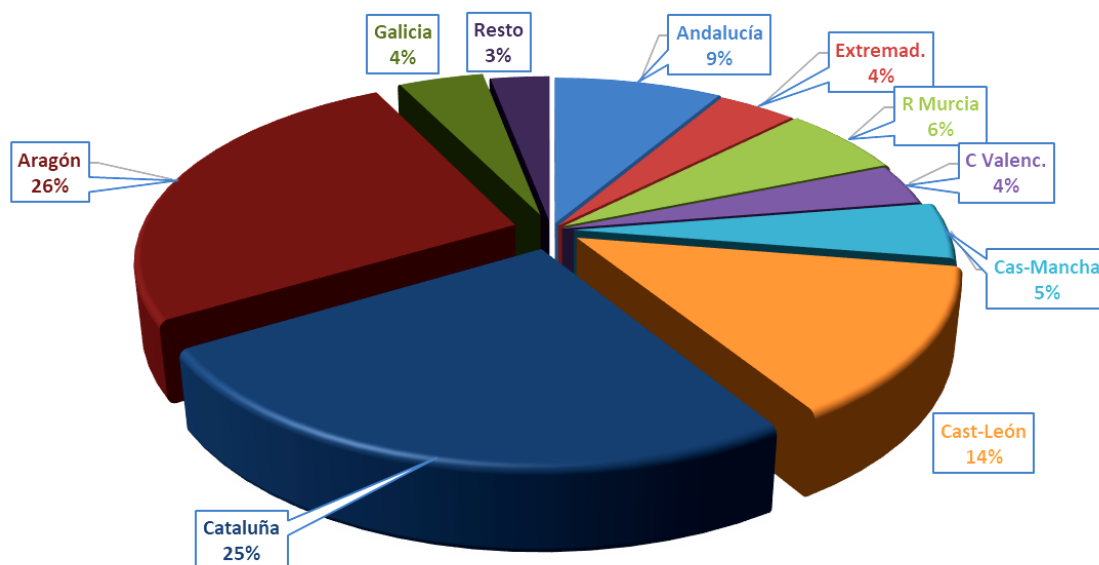


Figura 4. Distribución del censo porcino en España por comunidades autónomas. Fuente: DATACOMEX, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). 2020 Reproducción autorizada indicando publicación y fecha.

No obstante, la evolución en la comunidad es hacia explotaciones de mayor tamaño, mayor grado de automatización, con menor dependencia de la mano de obra y controles ambientales más desarrollados. En ese aspecto es **donde pretende incidir la presente tesis, analizando las características energéticas, productivas y medioambientales de las granjas porcinas con el fin de implementar procesos tecnológicos que redunden en un control ambiental más eficiente para mejorar las condiciones de bienestar de los animales y reducir el impacto ambiental derivado de la producción**, con la consiguiente mejora en el rendimiento de las explotaciones.

1.1.3 El sector porcino en España respecto al resto de países

Los datos de comercio exterior de 2019 han supuesto un importante cambio de tendencia en las exportaciones de carne de porcino españolas, con una nueva aceleración de las mismas y un incremento del 29%, con respecto al año anterior, como consecuencia del espectacular incremento, del 58,3%, de las exportaciones a países terceros (fig. 5).

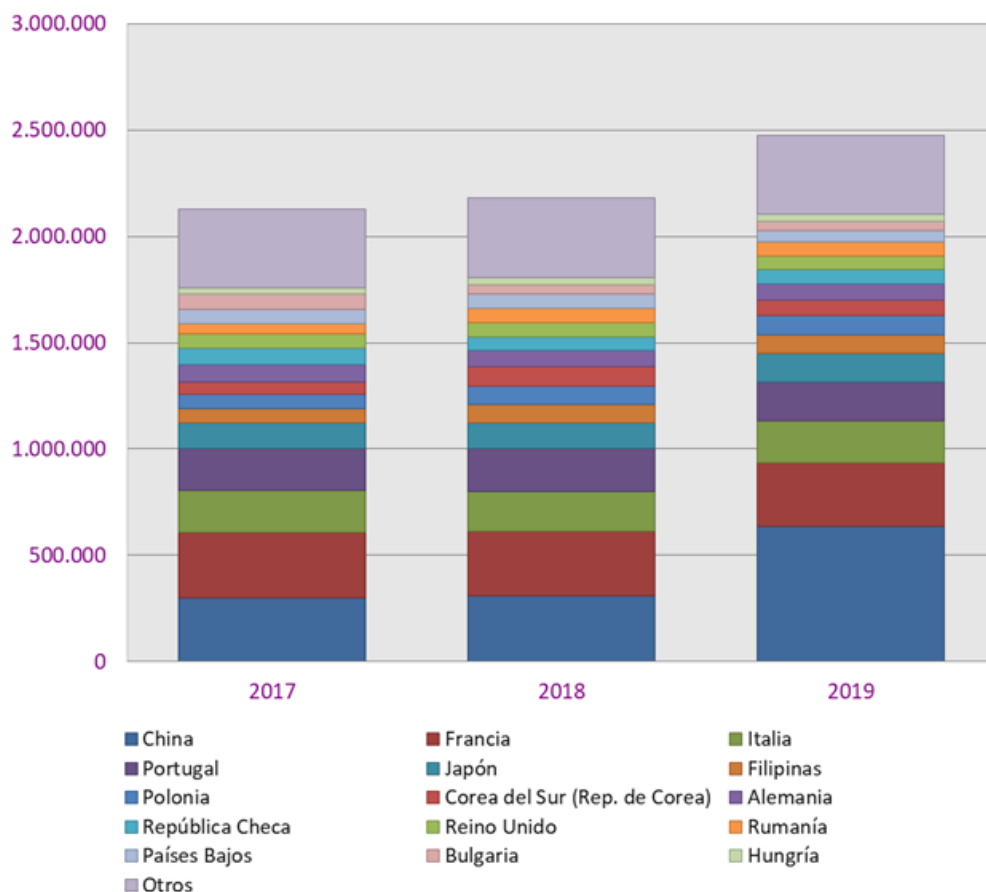


Figura 5. Exportaciones del sector porcino ciclo 2017-2019. Fuente: DATACOMEX, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). 2020 Reproducción autorizada indicando publicación y fecha.

Como se puede observar en la figura 5, el aumento es en gran parte debido al incremento en la exportación a China. A pesar de que este fenómeno se pudiese considerar circunstancial debido a la expansión de la PPA (peste porcina africana) en territorio chino, esto se ve compensado por el avance en la exportación a otros países. El análisis de la evolución de las exportaciones de España, sobre todo a terceros países, puede acreditar el enorme potencial del sector porcino en nuestro país.

De todo lo anterior se infiere la existencia de un nicho de producción en el sector que implica la aparición de nuevas explotaciones y el desarrollo de las actuales, mejorando las instalaciones y adaptándose a las actuales condiciones de producción, con optimización de recursos, mejora de las condiciones de los animales y disminución de impacto ambiental, lo que sugiere un mayor estudio de las condiciones productiva, energéticas y medioambientales en estas explotaciones.

1.2 VARIABLES AMBIENTALES EN EXPLOTACIONES DE GANADO PORCINO DE TRANSICIÓN

En las explotaciones ganaderas intensivas en general, y en las porcinas en particular, los animales están expuestos directamente a los contaminantes del aire, lo que favorece indirectamente la aparición de enfermedades (Kim *et al.*, 2005; Ni *et al.*, 2009). Por ello, el uso de sistemas de control ambiental en los alojamientos ganaderos tiene como objetivo mantener una serie de variables, como la temperatura, la humedad y las concentraciones de

contaminantes, en niveles óptimos debido a su influencia sobre muchos aspectos de la producción, como la salud y el bienestar de los animales, provocando efectos indirectos sobre el nivel de emisiones (Chen y Liu, 2019; Noya *et al.*, 2016; Philippe *et al.*, 2015; Hamon *et al.*, 2012; Soldatos *et al.*, 2005).

La temperatura es la variable ambiental predominante en los edificios ganaderos debido fundamentalmente a tres razones:

- 1) La simplicidad de la medición y del control ya que con una sonda se puede determinar la temperatura en el alojamiento, la cual es contrastada con la temperatura de consigna con lo que se determina la necesidad de ventilación o de calefacción.
- 2) El bajo coste de este tipo de control, ya que los elementos necesarios son económicos, incrementándose únicamente por el sistema de automatización de la climatización elegido.
- 3) Los efectos que esta variable tiene sobre el crecimiento y desarrollo de los animales, especialmente en las primeras semanas.

La economía de la solución es un tema de gran importancia en este tipo de explotaciones dado el carácter modular de los alojamientos y en consecuencia el elevado número de sistemas de control ambiental necesarios.

Sin embargo, en la producción porcina no sólo la temperatura ambiental es el factor que incide en el bienestar animal y el rendimiento de la producción. También deben ser tenidas en cuenta otras variables como la concentración de CO₂ o de NH₃ o la humedad relativa, todas ellas controlables mediante la tecnología actual. Además, deben de ser considerados factores relativos al propio animal como la edad, peso vivo, actividad y otros climáticos y estacionarios como la época del año, clima exterior, luminosidad, etc. Todos estos factores interaccionan de forma antagónica o sinérgica, de tal modo que la actuación sobre uno de ellos ofrece resultados sobre los otros, véase por ejemplo que un aumento de la ventilación a fin de reducir la temperatura del alojamiento produciría también una reducción de las concentraciones de CO₂ o de NH₃ así como de la humedad relativa. En consecuencia, las condiciones ambientales adecuadas deben ajustarse a las necesidades de los animales, prestando atención, además, al estado y al comportamiento de los mismos, los cuales pueden ser caracterizados por la actividad animal (Besteiro *et al.*, 2021; de Sousa y Pedersen, 2004).

La fase de transición, que incluye a los lechones entre 6 y 20 kg de p. v., fundamentalmente en el posdestete, es una fase muy sensible para los animales, en la medida en que provoca situaciones estresantes (Gilbert *et al.*, 2019; Dong y Pluske, 2007; Le Dividich y Herpin, 1994) que pueden afectar al rendimiento y a la salud intestinal de los lechones (Lu *et al.*, 2018). Durante esta fase, de unas cinco o seis semanas de duración, los lechones triplican su peso y sus requerimientos ambientales sufren cambios importantes. En consecuencia, el control ambiental debe adaptarse a las necesidades de crecimiento de los lechones y las variables ambientales deben de mantenerse en los niveles adecuados, los cuales cambiarán según las variaciones en las necesidades ambientales (Saha *et al.*, 2010). Algunos autores (Le Dividich y Herpin, 1994) clasificaron las exigencias de temperatura en tres períodos: el período crítico (las dos primeras semanas), el período poscrítico (las dos semanas siguientes) y el período final. Durante el período crítico, la temperatura crítica inferior debe estar en el rango de 26-28°C (Le Dividich y Herpin, 1994), que puede reducirse a 24°C en las siguientes dos semanas (Close y Stanier, 1984). Durante el período final, la temperatura interior se puede reducir rápidamente de 2 a 3°C por semana hasta que se alcance la temperatura de la nave de cebo a la que irán destinados. Los efectos de la humedad sobre la tasa de crecimiento de los animales son mucho menores que los de la temperatura (Huynh *et al.*, 2005). De hecho, no se espera que la humedad

del aire tenga mucha influencia en el rendimiento de los lechones destetados mantenidos dentro de la termoneutralidad (Forcada *et al.*, 2009; Guo *et al.*, 2001).

1.3 SISTEMAS DE CONTROL AMBIENTAL EN EXPLOTACIONES DE GANADO PORCINO

Los controladores modernos a menudo utilizan la temperatura exterior y la calidad del aire interior como parámetros para controlar los ajustes de ventilación. Sin embargo, normalmente solo se usa una sonda de temperatura para controlar estos sistemas y se establecen tasas de ventilación mínimas para controlar indirectamente las otras variables relevantes, como las concentraciones de gases o el polvo en el aire.

Debido a la complejidad de los sistemas de control ambiental y a la presencia de relaciones no lineales entre algunas variables ambientales en los alojamientos ganaderos (Sun *et al.*, 2008; Daskalov *et al.*, 2006;), los métodos basados en datos de inteligencia artificial capaces de modelar procesos no lineales pueden ser útiles. La búsqueda de estos nuevos métodos, más efectivos para el control ambiental, llevó al desarrollo de modelos para la predicción, entre otras variables, de la temperatura en el interior de los alojamientos de ganado porcino (Schauberger *et al.*, 2000; Daskalov, 1997). Dentro de ellos, los modelos ARIMA (Ortega *et al.*, 2018; Besteiro *et al.*, 2017) combinan tres componentes (autorregresión, integración y media móvil), lo que da como resultado modelos más generalizados y poderosos que los modelos obtenidos al usar cada componente por separado. Estos modelos permiten el análisis, la simulación y el desarrollo de estrategias de control. Además, se pueden utilizar para el control predictivo y se pueden incluir en nuevos métodos de control del microclima utilizando microprocesadores para la creación de sistemas reguladores ambientales eficaces (Soldatos *et al.*, 2005; Schauberger *et al.*, 2000).

Estos modelos, para la predicción de variables ambientales en diversos escenarios, requieren una validación exhaustiva antes de su uso. Además, el aumento global de la temperatura causado por el cambio climático exige modelos flexibles y adaptables que proporcionen estimaciones del error. Del mismo modo, la eficiencia energética en los edificios exige sistemas de control predictivo que incluyan modelos ambientales que se puedan aplicar a diversas ubicaciones geográficas. En consecuencia, la validación de modelos de ambiente interior se vuelve fundamental para asegurar la precisión y robustez de los modelos y, por tanto, su uso en sistemas predictivos para el control ambiental del alojamiento. En general, la literatura revela una falta de modelos validados para la predicción de variables ambientales en alojamientos ganaderos. Se han desarrollado distintos modelos, pero o no se han validado (Besteiro *et al.*, 2017; Lambert *et al.*, 2001; Axaopoulos *et al.*, 1992; Diesch y Froehlich, 1988), o han sido validados en periodos cortos, lo que no asegura su robustez ni la incorporación de los efectos del crecimiento animal (Rojano *et al.*, 2016; Upachaban *et al.*, 2016; Seo *et al.*, 2012; Liberati y Zappavigna, 2007; Daskalov, 1997). Algunos autores, para la estimación de las variables de salida del modelo, han utilizado una sonda o seleccionado un punto de referencia específico dentro del alojamiento, lejos de la zona ocupada por animales (Guo *et al.*, 2001; Cooper *et al.*, 1998; Daskalov, 1997). Sin embargo, otros autores se han centrado en la zona ocupada por animales (Upachaban *et al.*, 2016; van Wagenberg y de Leeuw, 2003). Por tanto, resulta interesante la validación de un modelo, durante un prolongado período de tiempo, para la predicción de la temperatura interior en la zona ocupada por los animales que permita el análisis de ciclos completos de cría, capaz de adaptarse al aumento de peso de los animales y a los cambios en las condiciones ambientales dentro del alojamiento. Además, debe de incorporar variables predictoras representativas de las condiciones exteriores, del funcionamiento de las instalaciones y del peso del animal.

Actualmente, el amoníaco (NH_3), junto con el sulfuro de hidrógeno (H_2S), es uno de los contaminantes más críticos para la producción porcina (Blanes-Vidal *et al.*, 2012; Ye *et al.*, 2008) debido a su relación directa con el bienestar y la salud de los animales y los trabajadores (Saha *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2005). En consecuencia, muchos autores han analizado los efectos de la concentración de NH_3 sobre el comportamiento, la salud y la productividad de los animales (Cheng *et al.*, 2014; Wathes *et al.*, 2004). Generalmente, se han reconocido los efectos negativos de las concentraciones de NH_3 sobre el estado fisiológico de los cerdos en términos de crecimiento y salud, pero no se han obtenido resultados experimentales consistentes. En realidad, mientras que algunos autores han afirmado que las concentraciones elevadas de NH_3 tienen efectos fisiológicos en los cerdos (Von Borell *et al.*, 2007; Hamilton *et al.*, 1998), otros autores no han encontrado una influencia clara sobre la expresión genética hepática (Cheng *et al.*, 2014) o el rendimiento del crecimiento de los cerdos (O'Connor *et al.*, 2010; Von Borell *et al.*, 2007). De acuerdo con la Directiva 91/630/EEC, las concentraciones de gas deben mantenerse dentro de límites que no sean dañinos para los cerdos a través del aislamiento, ventilación y calefacción de los edificios. Sin embargo, la Directiva no establece límites numéricos. Asimismo, no existe consenso sobre los niveles máximos permitidos de NH_3 . Mientras que la Comisión Internacional de Ingeniería Agrícola y de Biosistemas, CIGR, (2002) recomendó una concentración máxima de 20 ppm, Bottcher *et al.* (2001) fueron más cautelosos y consideraron adecuadas concentraciones por debajo de 15 ppm. También recomendaron precaución a niveles entre 15 y 25 ppm, y consideraron peligrosos los niveles superiores a 25 ppm. Límites de exposición más estrictos y seguros fueron propuestos por Cargill *et al.*, (2002) y Donham *et al.*, (2002), con 10 y 11 ppm respectivamente. El NH_3 contribuye significativamente al bienestar de los animales y a la prolongación de la vida útil de los equipos y las instalaciones (Webb *et al.*, 2005). Por estas razones, las emisiones de NH_3 son una de las preocupaciones relacionadas con el control ambiental. De hecho, la mayoría de los países europeos han destacado la importancia de reducir las emisiones de NH_3 y olores para limitar su impacto negativo en las comunidades locales y el medio ambiente (Saha *et al.*, 2010). Las concentraciones de NH_3 en los edificios porcinos muestran grandes variaciones y están relacionadas con una serie de factores, incluida la edad, la actividad y la densidad de los animales, la temperatura exterior, el control de la ventilación, la hora del día o la época del año (Ni *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2011; Schaubberger *et al.*, 1999). Además, durante la fase de transición, las grandes diferencias de requerimientos térmicos obligan a modificaciones frecuentes de la temperatura de consigna (Le Dividich y Herpin, 1994) para controlar los sistemas de climatización, por lo que esta variable puede ser decisiva en el establecimiento de patrones de evolución de las concentraciones de contaminantes, concretamente de NH_3 . Las concentraciones de NH_3 no muestran un patrón diario evidente, pero los picos más bajos tienden a ser durante la mitad de la noche (Banhazi, 2013). Sin embargo, su medición con precisión requiere de equipos extremadamente caros (Banhazi *et al.*, 2008) y presenta numerosas dificultades, más particularmente la detección de amoníaco en continuo, ya que la exposición prolongada del sensor, y en ambientes pulverulentos, produce la saturación del mismo lo que supone elevados costes de mantenimiento. Por ello, se persigue que los sistemas convencionales de control, con la temperatura como única variable, puedan considerar la concentración de NH_3 aplicando un algoritmo sencillo basado en variables propias del sistema de climatización.

Las instalaciones de transición, al igual que las de partos, están constituidas por numerosas salas, lo que requiere la instalación de una gran cantidad de dispositivos de medición y control en una sola granja. Sin embargo, el control ambiental se ha basado comúnmente en el uso de datos de una sola sonda de temperatura (Detsch *et al.*, 2018; Fournel *et al.*, 2017; Besteiro *et al.*, 2017), sin tener en cuenta otras variables como la humedad (Lorenzena *et al.*, 2020) o el

CO₂ y el NH₃ (Banhazi *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2008), de creciente interés debido a su impacto en la producción porcina (Yeo *et al.*, 2019) las cuales no son controladas y deben ser incluidas en la automatización (Ortega *et al.*, 2018).

Por ello, se hace necesario definir nuevas estrategias de control, de bajo costo, que puedan ser implementadas fácilmente en explotaciones porcinas convencionales en zonas de clima oceánico. Dichas estrategias deben contribuir a lograr el máximo rendimiento con el menor uso posible de recursos, teniendo en cuenta el bienestar animal y la eficiencia productiva. Para ello, se caracterizó en términos de producción y ambiente una explotación porcina convencional, de producción de lechones de 20 kg de p.v. con control ambiental basado en la temperatura. La caracterización de la granja reveló las relaciones entre distintas variables ambientales fácilmente medibles y su adaptación al crecimiento de los lechones a lo largo del ciclo, así como los principales problemas relacionados con las estrategias de control.

Una buena estrategia de control puede prevenir algunos efectos de control retardados causados por retrasos en el tiempo de los dispositivos y proporcionar un control del ambiente térmico interior esperado a tiempo (Xie *et al.*, 2019). Por ello, el establecimiento de modelos para la predicción de variables ambientales en diversos escenarios resulta de interés para su posterior incorporación en los sistemas de control convencionales mediante la aplicación de algoritmos simples. Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirán a disminuir el impacto ambiental de la producción ganadera (Van Ransbeeck *et al.*, 2012) y mejorar el estado de bienestar animal (Hamon *et al.*, 2012) mientras se mantiene la productividad (García-Ramos *et al.*, 2018; Saha *et al.*, 2014; Takai *et al.*, 2013; Calvet *et al.*, 2011a y b; Philippe *et al.*, 2011; Blanes-Vidal *et al.*, 2008).

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS

Tal y como se ha establecido en la introducción, la búsqueda de modelos de explotación ganadera más respetuosos mediante la mejora del bienestar animal y de la eficiencia energética involucra un gran número de variables productivas, ambientales y energéticas. La interacción entre estas variables y su relación con el funcionamiento de las instalaciones de climatización presentes en explotaciones porcinas de transición para la cría de lechones (6-20kg p.v.), en las que conviven ventilación y calefacción para el acondicionamiento del aire, son de vital importancia y deben ser valoradas en explotaciones convencionales de cara a su mejora. Este tipo de explotaciones tienen que adaptarse a grandes variaciones de las condiciones ambientales óptimas de los lechones a medida que crecen, lo cual requiere gran elasticidad de los sistemas de control ambiental, así como demandas energéticas importantes. La predicción fiable de variables ambientales como la temperatura, presente en todas las estrategias de control ambiental y de otras como la concentración de amoníaco, el gas más relevante en aire de las explotaciones porcinas, son de vital importancia en la eficiencia energética y el bienestar animal.

En base a estas hipótesis, se establecen los siguientes objetivos específicos para esta T. D.:

1. Definir nuevas estrategias de bajo costo que puedan implementarse fácilmente explotaciones convencionales en áreas con clima oceánico para así contribuir al logro del máximo rendimiento con el menor uso posible de recursos centrándonos en el bienestar animal y la eficiencia productiva. Para ello, se plantea la caracterización productiva, energética y ambiental de una explotación convencional con control ambiental basado en la temperatura, ubicada en una zona de alta densidad ganadera. Mediante esta caracterización se pretende obtener las relaciones entre variables ambientales fácilmente medibles y su adaptación al crecimiento de los lechones a lo largo del ciclo, así como identificar los principales problemas relacionados con las estrategias de control.

Este objetivo se aborda en el artículo: Fernandez, M. D., Losada, E., Ortega, J. A., Arango, T., Ginzo-Villamayor, M. J., Besteiro, R., Lamosa, S., Barrasa, M. & Rodriguez, M. R. (2020). Energy, production and environmental characteristics of a conventional weaned piglet farm in northwest Spain. *Agronomy*, 10(6), 902. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060902>.

2. Proporcionar una herramienta fiable para su empleo en estrategias de ahorro energético adecuada para su uso en sistemas predictivos para el control del clima. Para ello se validará ampliamente un modelo de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA), diseñado por Besteiro et al. (2017), para la predicción de la temperatura interior en la zona animal de una explotación porcina de transición convencional. Para la validación del modelo se analizará tanto su precisión como su robustez durante un período de 292 días. De este modo se podrá observar la capacidad del modelo para adaptarse a diferentes condiciones a través de las variables predictoras que integra que son representativas de las condiciones exteriores, del funcionamiento de los sistemas de climatización y del peso de los animales, directamente relacionado con su bienestar.

Este objetivo se aborda en el artículo: Ortega, J. A., Losada, E., Besteiro, R., Arango, T., Ginzo-Villamayor, M. J., Velo, R., Fernandez, M. D. & Rodriguez, M. R. (2018). Validation

of an AutoRegressive Integrated Moving Average model for the prediction of animal zone temperature in a weaned piglet building. *Biosystems Engineering*, 174, 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012>.

3. Determinar niveles de concentración de NH_3 a través de otras variables de más fácil medición en explotaciones porcinas de transición que permitan el diseño de estrategias de reducción de la concentración de NH_3 a bajo coste. Para ello se obtendrán los patrones diarios de la concentración NH_3 en la zona ocupada por animales de una explotación convencional de transición y su relación con la temperatura de consigna definida en los sistemas de climatización. Mediante estos patrones, la concentración de NH_3 puede incorporarse en sistemas de control convencionales con la temperatura como variable de entrada única aplicando un algoritmo sencillo basado en las variables utilizadas por el sistema de climatización. Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirán a disminuir el impacto ambiental de la producción ganadera y la mejora del estado de bienestar animal, manteniendo la productividad.

Este objetivo se aborda en el artículo: Rodríguez, M. R., Losada, E., Besteiro, R., Arango, T., Velo, R., Ortega, J. A., & Fernandez, M. D. (2020). Evolution of NH_3 Concentrations in Weaner Pig Buildings Based on Setpoint Temperature. *Agronomy*, 10(1), 107. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010107>.

El objetivo general de este trabajo es la obtención de un conjunto de herramientas de fácil implementación en los sistemas de control ambiental y a bajo coste en explotaciones convencionales de transición de ganado porcino para contribuir a una producción más sostenible, ambientalmente eficiente y centrada en el bienestar animal.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENSAYO EXPERIMENTAL

El estudio se realizó en una sala de transición para lechones de 6 a 20 kg de peso vivo en una granja porcina con capacidad para 4.895 cerdas. La finca está ubicada en el noroeste de España (ED50: 43°10'15''N 8° 19 '24' 'W), en una región de clima oceánico y con alta densidad ganadera.

Las dimensiones interiores de la sala fueron de 11,82 m de largo por 5,86 m de ancho y de 2,50 a 2,25 m de alto. La sala contenía seis corrales a cada lado de un pasillo central y albergaba un máximo de 300 lechones (fig. 6). El sistema de ventilación estaba compuesto por un extractor helicoidal de 500 mm con las siguientes especificaciones: 230 VAC, 50 Hz, 1.330 rpm y 480 W de potencia. La sección de entrada de aire al ventilador permitía su regulación manual mediante un sistema de compuerta mediante el que se limitaba la sección al principio del ciclo, con mayores secciones con el paso del tiempo. El aire fresco entraba en la sala a través de dos ventanas con deflectores de aire en la pared opuesta al ventilador, a cada lado de la puerta de entrada a la sala. El sistema de calefacción por suelo radiante estaba compuesto por dos placas de poliéster de 1,20 x 0,40 m calefactadas por agua, con una capacidad de 2,90 l, colocadas en el centro de cada corral.

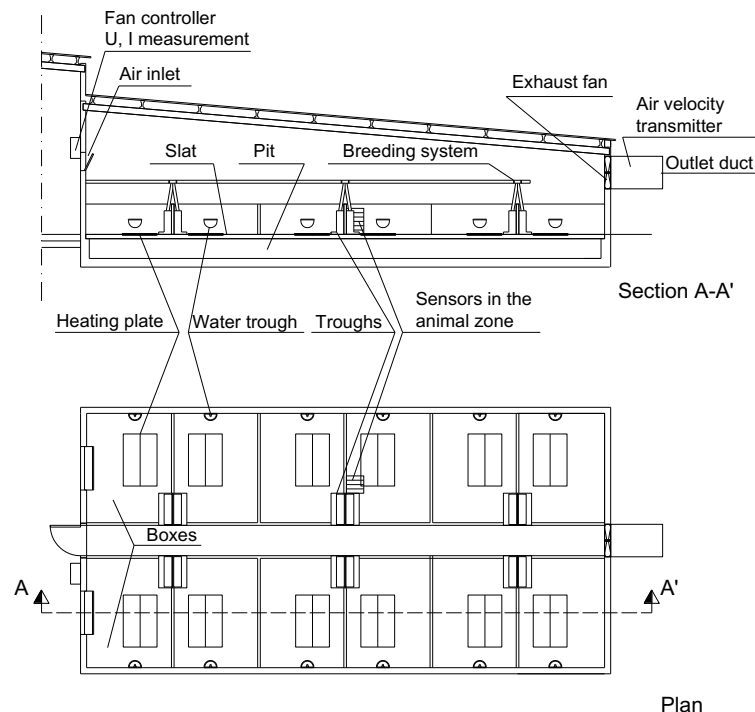


Figura 6. Planta y sección de la sala de transición y ubicación de los sensores.

3.2 MEDICIÓN Y DETERMINACIÓN DE VARIABLES

Se midieron variables ambientales que afectan al bienestar animal y a la producción que podrían medirse e implementarse fácilmente en granjas convencionales, así como otros datos necesarios para la validación del modelo de temperatura en la zona animal y de estimación de patrones de NH_3 . Los sensores deben ser económicos, robustos, confiables y capaces de proporcionar mediciones a largo plazo con un mantenimiento mínimo, de manera que puedan incorporarse fácilmente a los controles ambientales. Esto no es aplicable a la medición de la concentración de amoníaco, donde el objeto es determinar su comportamiento para inferir esa medición en base a otros sensores que cumplan las anteriores especificaciones. En consecuencia, la variable más importante fue la temperatura interior (Doltz *et al.*, 2015; Peters *et al.*, 2012; Huynh *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2001), que es la base del sistema de control ambiental. Se utilizó la humedad relativa debido a sus efectos sobre el bienestar animal y el balance energético (Chen y Liu, 2019; Doltz *et al.*, 2015; Huynh *et al.*, 2005; Guo *et al.*, 2001). Además, se midió la velocidad del aire en la zona de los animales porque los animales son muy sensibles a las corrientes de aire durante el posdestete (Forcada *et al.*, 2009). Se midió también la concentración de CO_2 (Chen y Liu, 2019; Peters *et al.*, 2012; Besteiro *et al.*, 2017) porque, a diferencia de otros gases, el CO_2 cumple los criterios definidos para la selección de variables. Finalmente, se midió la concentración de NH_3 . Por tanto, las variables medidas dentro de la habitación fueron temperatura, humedad, concentración de CO_2 , concentración de NH_3 y velocidad del aire (fig. 6). Los sensores utilizados para medir las variables de confort ambiental interior se dispusieron en un corral central, en una jaula protectora en la zona animal, a 0,40 m de altura. Los sensores utilizados para medir cada una de las variables ambientales fueron:

- Humedad (HR_{az}) y la temperatura (T_{az}) en la zona ocupada por animales se midieron utilizando sensores modelo S-THB-M008 (Onset Computer Corporation, Bourne, MA, EE. UU.), con rango de medición de temperatura de 40-75° C, precisión de 0,21 °C en el rango de 0-50 °C, y rango de humedad relativa del 0% al 100% y precisión del 2,50% del 10% al 90% de humedad relativa.

- Concentración de CO_2 en la zona animal (C_{CO_2}) se midió utilizando transmisores Delta Ohm HD37BTV.1 con tecnología infrarroja de doble onda (NDIR) y rango de medición de 0 a 5000 ppm.

- Concentración de NH_3 en la zona ocupada por animales (C_{NH_3}): detector electroquímico ST – IAM IP66 (Murco Ltd, Dublín, Irlanda) con protección contra salpicaduras, rango de detección de 0 a 100 ppm, precisión del 5%, corrección de temperatura y calibración de fábrica de cero automático antes de la instalación, implementada con un filtro de partículas hecho de tela metálica con un ancho de apertura de 0,168 mm y un diámetro de alambre de 0,110 mm.

- Velocidad del aire en la zona animal (v) se midió utilizando una sonda omnidireccional de alambre caliente Delta Ohm HD103T.0, con un rango de medición de 0,08 a 5 m s^{-1} .

Además, se midió la temperatura del aire fresco en la entrada de aire (T_{ac}) con sensores de tipo de coeficiente de temperatura negativo, modelo 107 (Campbell Scientific Ltd., Loughborough, Reino Unido), con rango de medición de -35–50 °C y un error de intercambiabilidad del termistor $\leq \pm 0,20$ C en el rango de 0 a 50 °C.

Varios autores midieron las variables energéticas (Doltz *et al.* 2015; Schaubberger *et al.*, 2000). Para determinar la energía de calefacción y ventilación y las tasas de ventilación, se midieron los siguientes parámetros utilizando los sensores que se describen a continuación:

- Caudal del sistema de calefacción (Q_{hs}): Caudalímetro ultrasónico Siemens SITRANS F US Clamp-on FST020 IP65 NEMA 4X.

- Temperatura en la entrada (T_i) y salida (T_o) del sistema de calefacción: Campbell Scientific Ltd modelo 108, con un rango de medición $-5^\circ - +95^\circ\text{C}$, $\pm 0.5^\circ\text{C}$.
- Voltaje de funcionamiento del ventilador (U): Transformador de potencial de CA Magnelab (PT) T-MAG-SPT-600 (Onset Computer Corporation), que, conectado a un módulo TRSM de Onset Computer Corporation, proporcionó un valor efectivo.
- Corriente de funcionamiento del ventilador (I): Transformador de corriente CA Magnelab SCT-0750-050 (Onset Computer Corporation), que, conectado a un módulo TRSM de Onset Computer Corporation, proporcionó un valor efectivo.
- Velocidad del aire extraído a través del sistema de ventilación (v_m): Transmisor activo de velocidad del aire Delta Ohm HD2903TTC310 instalado en la salida del ventilador según el método de Hinz y Linke, 1998, y adaptado a la sonda utilizada. El anemómetro dispone de un rango de medición entre 0,05 y 20 m s⁻¹, con un rango de funcionamiento entre -10 y 60°C .

Las temperaturas medidas con las sondas de temperatura 107 y 108 (T_{ac} , T_i y T_o) se almacenaron en un registrador de datos Campbell Scientific Ltd. CR-10X. El resto de las mediciones en interiores se almacenaron en un registrador de datos HOBO H-22 de Onset Computer Corporation.

Además de las variables interiores anteriores, se midieron algunas variables ambientales exteriores debido a sus efectos sobre el balance energético del edificio y para la validación del modelo de temperatura tales como la temperatura (T_{out}) (Schauberger *et al.*, 2000) y la humedad, HR_{out} (Doltz *et al.*, 2015). Además, se midieron la presión atmosférica, la velocidad y la dirección del viento. Las variables exteriores se midieron utilizando una estación meteorológica EIC Control U-30 de Onset Computer Corporation.

Todas las variables se muestrearon a intervalos de 1 segundo y se almacenaron los valores medios cada 10 minutos. Los datos fueron almacenados entre el 6 de octubre de 2011 y el 12 de mayo de 2013, a lo largo de nueve ciclos de destete (tabla 1). Además, los lechones se pesaron al entrar, en un punto intermedio del ciclo (entre los días 9 y 22) y al salir de la sala de transición. Diariamente, se registraron las temperaturas de consigna (T_s) introducidas a lo largo de cada ciclo, así como la apertura de la sección del sistema de ventilación (S_{ao}). Finalmente, se recopilaban datos de las tasas de mortalidad de los lechones para cada ciclo. Estas tasas de mortalidad se estimaron a partir de las observaciones diarias realizadas en la sala para cada ciclo de producción.

Dados la duración del ensayo experimental y el número de variables medidas y, en consecuencia, la gran cantidad de datos obtenidos, éstos fueron la base de distintas tesis doctorales, dos de ellas previas al presente trabajo (Ortega, 2015; Arango, 2017).

Fecha	Ciclos					
	I	II	III	IV	V	VI
Inicio	06/10/2011	21/11/2011	09/01/2012	26/02/2012	12/04/2012	31/05/2012
Fin	16/11/2011	03/01/2012	20/02/2012	04/04/2012	21/05/2012	11/07/2012
	VII	VIII	IX			
Inicio	19/07/2012	25/02/2013	11/04/2013			
Fin	31/08/2012	08/04/2013	21/05/2013			

Tabla 1. Fechas de inicio y finalización de cada uno de los ciclos de transición.

Para la caracterización productiva, energética y ambiental de la explotación se emplearon datos de los ciclos I a VII. Para la validación extensa del modelo ARIMA de temperatura en la zona animal, se emplearon datos de los ciclos II a VII y del ciclo IX (numerados en el artículo con números arábigos 1-7). Dada la dificultad de medición prolongada de la concentración de amoníaco, para obtención de su modelo senoidal se emplearon datos del ciclo VIII, durante el

cual los datos de temperatura exterior fueron proporcionados por la red de estaciones meteorológicas públicas de Meteogalicia, en particular por la estación meteorológica Abegondo (43°24'14" N, 8°26'22" W; elevación: 94 m).

Los requisitos de energía del sistema de calefacción para cada ciclo, W_{hs} en kJ, se determinaron a partir de la siguiente expresión:

$$W_{hs} = \sum_1^n Q_{hs} \rho c (T_i - T_o) \Delta t$$

Donde n es el número de intervalos medidos por ciclo; Q_{hs} es el flujo promedio del sistema de calefacción medido por el caudalímetro a intervalos de 1 segundo y almacenado a intervalos de 10 minutos, en $m^3 s^{-1}$; ρ es la densidad del agua, $9.933,7 kg m^{-3}$; c es la capacidad calorífica de volumen específico del agua a $30^\circ C$, $4,178 kJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$; T_i y T_o son las temperaturas del agua que fluye dentro y fuera del sistema de calefacción, respectivamente, en $^\circ C$; y Δt es el tiempo para cada intervalo de medición, 600 s.

Los requisitos de energía eléctrica para el sistema de ventilación forzada, W_{vs} en kJ, se calcularon utilizando la siguiente expresión:

$$W_{vs} = \sum_1^n UI \cos \varphi \Delta t$$

Donde n es el número de intervalos medidos por ciclo; U es la tensión de funcionamiento del ventilador, en V; I es la corriente de funcionamiento del ventilador, en A; $\cos \varphi$ es el factor de potencia del ventilador y Δt es el tiempo para cada intervalo de medición, 600 s.

El caudal de aire extraído a través del ventilador, Q en $m^3 s^{-1}$, se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Q = 1.401 v_m S$$

Donde 1.401 es la relación entre la velocidad promedio y la velocidad medida experimentalmente, v_m es la velocidad medida en $m s^{-1}$ y S es la sección del conducto de medición, $0.302 m^2$.

El volumen de aire extraído, V_{ao} en m^3 , se estimó a partir de la siguiente expresión:

$$V_{ao} = Q \Delta t$$

Donde Q es el caudal de aire extraído a través del ventilador en $m^3 s^{-1}$ y Δt es el intervalo entre mediciones (600 s).

3.3 METODOLOGÍA ESPECÍFICA EMPLEADA PARA CARACTERIZACIÓN PRODUCTIVA, ENERGÉTICA Y AMBIENTAL A LO LARGO DE LOS CICLOS ANALIZADOS

Se realizó un análisis descriptivo integral de las variables ambientales medidas en la zona animal para todo el conjunto de datos, para cada ciclo y para los períodos crítico, poscrítico y final. Para determinar si se debe utilizar una prueba paramétrica o no paramétrica, se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para probar la normalidad. El análisis del conjunto de los datos de cada ciclo reveló que las variables de estudio no se adaptan a una distribución normal. Sin embargo, estas estadísticas son demasiado sensibles a pequeñas desviaciones de la normalidad cuando se utilizan muestras grandes. Se recolectaron muestras aleatorias de 300 observaciones para cada variable y ciclo, de manera que las pruebas de normalidad pudieran usarse sin pérdida de confiabilidad. Por lo tanto, todas las variables fueron normales, ya sea directamente (temperatura durante el ciclo I, humedad relativa durante los ciclos I y VII y concentración de CO₂ durante el ciclo I) o utilizando el Sistema de Distribuciones de Johnson. En consecuencia, se realizó un análisis paramétrico.

Como los datos no satisfacían el supuesto de homocedasticidad según la prueba de Levene, no se pudo utilizar ANOVA. Los estadísticos de Brown-Forsythe (Brown y Forsythe, 1974) y Welch (Welch, 1947), utilizados por Di Pasquale, (2019), proporcionan una alternativa sólida al estadístico ANOVA F cuando no se cumple el supuesto de homocedasticidad. La prueba post-hoc de Games-Howell es apropiada cuando no se satisface el supuesto de homogeneidad de las varianzas (Pardo-Merino y Ruiz, 2005; Li *et al.*, 2019). Por lo tanto, se utilizaron las pruebas de Brown-Forsythe, Welch y Games Howell para determinar cómo la evolución del clima afectó los ciclos de producción y cómo los períodos de cada ciclo afectaron las variables ambientales en la zona animal. El nivel de significancia fue 0.05.

El software estadístico utilizado fue R, versión R-3.3.2.

3.4 METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA VALIDACIÓN DEL MODELO ARIMA DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL

3.4.1 Modelo

El método ARIMA se basa en la suposición de que las observaciones pasadas pueden explicar la evolución presente y futura de series temporales. En los modelos ARIMA, se pueden incorporar variables exógenas relacionadas con la variable dependiente del estudio, conocida como predictor o independiente. Hay tres básicos de componentes en un modelo ARIMA: Auto-Regresión, Integración y media móvil. El modelo ARIMA investigado en este trabajo fue elaborado por Ortega (2015) y Besteiro *et al.* (2017). El modelo permite la predicción de valores diezminutales de la zona animal temperatura para un ciclo completo de producción de aproximadamente 6 semanas. El modelo incluyó las siguientes variables predictoras: (1) el clima exterior, definido por la temperatura del aire exterior (T_{out}), (2) la operación del sistema de ventilación, definido por el área de la sección de salida de aire (S_{ao}) y el volumen de extracción aire (V_{ao}) y (3) la masa corporal de los animales (W_a). Los modelos más usuales de crecimiento porcino muestran un ajuste exponencial subyacente (Vincek *et al.*, 2012; Wellock, Emmans y Kyriazakis, 2003). Por ello, se utilizó este ajuste exponencial para los tres pesajes realizados para obtener valores diezminutales de masa corporal animal.

El modelo muestra una estructura 2,1,2, (p, d, q), lo que indica el orden más alto de cada componente, dos retrocesos para el orden de retardo (p), solo un retroceso para el grado de diferenciación (d) y dos retrocesos para la ventana de promediación (q) de la variable predicha. La estructura del modelo muestra los máximos retrocesos necesarios para cada componente de la variable predicha.

La tabla 2 muestra los retrocesos aplicados para cada componente (p, d, q) de las variables de estudio. Así, la serie para todas las variables se han diferenciado de los valores anteriores (d = 1). Para predecir T_{az} , se emplearon el primer y segundo retroceso para el componente autorregresivo y solo un retroceso para el componente de media móvil. Para las variables predictoras, se emplearon los valores actuales y un retroceso para el autorregresivo componente. No se aplicó la media móvil a las variables predictoras. De entre los modelos desarrollados por Besteiro *et al.* (2017), se eligió el Modelo 4.4 porque mostraba un nivel de significación de 0,055, lo que permitió suposición de la aleatoriedad de sus residuos al 95% de confianza nivel. Este modelo fue el único modelo que describió la evolución de la variable, en la medida en que produjo una serie de residuos con una estructura que era similar a la de Gauss, es decir, ruido

Componente	T _{az} (°C)	T _{ao} (°C)	S _{ao} (cm2)	V _{ao} (m3)	W _a (kg)
p	1	0	0	1	0
	2	1	-	-	-
d	1	1	1	1	1
q	1	-	-	-	-

Tabla2. Retrocesos para cada componente, orden de retraso (p), grado de diferenciación (d) y ventana de promedio (q) de la variable prevista, temperatura de la zona animal (T_{az}); p y d de las variables predictoras temperatura del aire exterior (T_{ao}), área de la sección de salida del aire (S_{ao}), volumen de aire extraído (V_{ao}) y masa corporal animal (W_a).

Para validar el modelo se utilizaron siete ciclos productivos, II, III, IV, V, VI, VII y IX, con una duración promedio de 41,71 días entre el 21 de noviembre de 2011 y el 20 de mayo de 2013 (tabla 1), los cuales no incluyeron los periodos utilizados para el diseño del modelo. Se midieron las siguientes variables: T_{az}, T_{ao}, S_{ao}, V_{ao} y W_a.

3.4.2 Análisis estadístico

Para determinar la precisión y solidez del modelo se analizaron las diferencias entre los valores medidos y predichos para cada ciclo validado. Los estadísticos utilizados fueron:

Error porcentual absoluto medio (MAPE):

$$MAPE = \frac{\sum_{t=0}^t |X_t - \tilde{X}_t| \cdot 100}{X_t \cdot n}$$

Donde: X_t es el valor medido en el momento t, \tilde{X}_t es el valor predicho por el modelo en el momento t y n es el número de registros.

Error medio (ME):

$$ME = \frac{\sum_{t=0}^t (X - \tilde{X}_t)}{n}$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^t (X_t - \tilde{X}_t)^2}{n}}$$

Coefficiente de determinación (R²)

$$R^2 = \frac{(COV_{X\tilde{X}})^2}{\sigma_X^2 \sigma_{\tilde{X}}^2}$$

Donde: COV_{X \tilde{X}} es la covarianza de X y \tilde{X} , σ_X^2 es la desviación estándar de X y $\sigma_{\tilde{X}}^2$ es la desviación estándar de \tilde{X} .

Los parámetros y la estructura del modelo ARIMA se estimaron utilizando el módulo Expert Modeler incluido en SPSS Statistics 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.).

3.5 METODOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DEL MODELO SENOIDAL DE LA CONCENTRACIÓN DE AMONÍACO A DISTINTAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA

Las temperaturas de consigna para el control ambiental de la sala y los periodos de medición para cada una de ellas son los que se muestran en la tabla 3

TEMPERATURAS DE CONSIGNA PARA EL CONTROL AMBIENTAL Y PERÍODOS DE MEDICIÓN				
	TEMPERATURA DE CONSIGNA (ST) (°C)			
	26	25	24	23
Fecha comienzo	2 marzo	8 marzo	19 marzo	27 marzo
Fecha fin	6 marzo	17 marzo	25 marzo	7 abril
Nº de días	5	10	7	12
Sección entada aire ventilador (m ²)	0.0707	0.0962	0.1256	0.1963

Tabla 3. temperaturas de consigna para el control ambiental y periodos de medición

3.5.1 Análisis matemático:

Se estimó la concentración media de NH₃ en cada temperatura de consigna cada diez minutos, lo que proporcionó un patrón de evolución diario promedio que se ajustó por mínimos, cuadrados a una función sinusoidal, usando la siguiente ecuación:

$$C_{\text{NH}_3}(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B$$

Donde: C_{NH_3} es la concentración, en ppm; A es la amplitud, en ppm; ω es velocidad angular en rad min⁻¹; φ es el ángulo inicial de fase, en rad; B es la variable independiente que representa a la concentración media diaria en la zona animal, en ppm.

Para el cálculo de las distintas componentes de la función senoidal se emplearon las siguientes expresiones:

$$A = \frac{C_{\text{NH}_3\text{MAX}} - C_{\text{NH}_3\text{MIN}}}{2}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 4.36E - 3$$

$$\varphi = \omega t_0$$

$C_{\text{NH}_3\text{MAX}}$ y $C_{\text{NH}_3\text{MIN}}$ son las concentraciones máxima y mínima, respectivamente, en la zona animal, en ppm; T es el período de la onda, 1440 min; y t_0 es el tiempo durante el cual la onda toma el valor medio, en min.

La bondad de ajuste entre los valores medidos y los estimados se definió por el coeficiente de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y la desviación estándar del error (SDE), en ppm.

Además, se utilizó la Fast Fourier Transform (FFT) para el análisis armónico. Previamente, la serie temporal aditiva se descompuso en las componentes de tendencia, estacional y aleatorio. La FFT se aplicó solo a la componente estacional de la serie, lo que proporcionó una buena representación del promedio de los días analizados.

4. DISCUSIÓN GENERAL

Actualmente, en las explotaciones tradicionales lo más usual es el control ambiental en función de la temperatura en el interior del alojamiento mediante el empleo de una o varias sondas de temperatura. Sin embargo, cada día se van implantando controles más exhaustivos, que implican el estudio de otros parámetros, como pueden ser humedad relativa, concentraciones de amoníaco (NH_3) o de dióxido de carbono (CO_2), etc., que determinan de una forma más exhaustiva la calidad del aire en los alojamientos, lo que redundará en una mejora del bienestar animal, con las ventajas en cuanto a sanidad de los animales y rendimientos que esto implica, así como un mayor y mejor control de las emisiones. No obstante, la incorporación de estos parámetros en los sistemas de control presenta una serie de inconvenientes, como pueden ser las dificultades en su medición, los costes de instalación y mantenimiento o la interacción entre los distintos parámetros que intervienen en el control. De todos modos, el coeficiente beneficios/costes de su empleo es tan evidente, que la tendencia actual debe de ser a una progresiva implantación de los mismos. Además, en las actuales condiciones, los costes energéticos y las emisiones de gases al exterior, obligan a analizar y a tener en cuenta todos estos parámetros, ya que inciden directamente en la ventilación con la que se va a realizar la renovación del aire, reduciendo las concentraciones de gases no deseados como el CO_2 y NH_3 .

La T.D. trata dos aspectos fundamentales en explotaciones de producción de lechones: el bienestar animal y la eficiencia energética, siempre en relación con el control ambiental de sus instalaciones. Así, el primer trabajo identifica como principal problema, en granjas con control ambiental basado en la temperatura, la falta de adecuación de esta variable a los requerimientos exigidos por el animal durante determinados períodos de tiempo. En este caso el exceso de temperatura producido se relaciona con la inercia térmica vinculada al funcionamiento del sistema de climatización, formado por dos equipos, calefacción y ventilación, que a su vez tienen diferentes tiempos de respuesta. Mientras que la respuesta del sistema de calefacción es lenta, del orden de horas, para conseguir las diferentes temperaturas dentro del local a lo largo del ciclo; la ventilación consigue efectos mucho más rápidos, del orden de minutos, de cara a la calidad ambiental, pero a su vez es mucho más dependiente de la temperatura exterior. Este déficit en la climatización supone también una carencia en el bienestar de los lechones, así como un incremento del consumo energético necesario para el sistema de calefacción.

Por todo lo anterior, centrándonos únicamente en la variable temperatura, existe una amplia posibilidad de mejorar el sistema mediante una mejor adecuación del mismo a las temperaturas demandadas, lo que supondría un ahorro energético. La solución a ambos problemas pasa por la predicción de las temperaturas en el interior del alojamiento en períodos de tiempo compatibles con los del sistema de control. Para ello, el empleo de modelos de simulación es de gran importancia y deben de incluir información de otras variables ambientales, del sistema de climatización y de los animales. Un modelo que reúne todos estos condicionantes es el modelo *autorregresivo integrado de media móvil*, ARIMA, formulado por Besteiro *et al.* (2017). Sin embargo, su empleo está limitado por la falta de validación, lo cual es ampliable a otros similares (Daskalov, 1997; Schauburger y Pilati, 1998; Seo *et al.*, 2012; Cooper *et al.*, 1998; van Wagenberg *et al.*, 2004; Rojano *et al.*, 2016; Upachaban *et al.*, 2016).

La validación de los modelos para poder ser empleados como parte del sistema de control es indispensable, ya que, de otro modo, los resultados obtenidos no tendrían precisión suficiente

y no evitarían pérdidas energéticas indeseadas ni se adaptarían a las temperaturas deseadas. Es por ello que la validación amplia realizada en este trabajo ha demostrado la robustez del modelo, con una precisión y exactitud aceptable, como ya se ha presentado, haciendo del mismo una herramienta valiosa en climas templados aplicable a todo el ciclo productivo.

Además de la temperatura, la evaluación de variables ambientales de gran incidencia en el bienestar como son la humedad relativa, las concentraciones de CO_2 y de NH_3 es de gran interés. Tanto la humedad como la concentración de CO_2 se han podido estudiar a lo largo de todos los distintos ciclos, pero no así la concentración de NH_3 , de gran incidencia en la salud de los animales. El empleo de sensores de NH_3 electroquímicos para la medición en granja es cara, pero posible, no como otros equipos de empleo en investigación, pero prohibitivos en explotación real. Este tipo de sensores presenta como problema principal su mantenimiento y saturación cuando son instalados para la realización de mediciones durante períodos de tiempo prolongados. De este modo, se ha procedido a estudiar la evolución de la humedad relativa y de la concentración de CO_2 a lo largo del conjunto de ciclos y, a partir de datos más limitados, de la concentración de NH_3 , desarrollando modelos de comportamiento en relación a distintas variables de más fácil medición que pueden ser incluidas en el control ambiental. Del análisis ambiental, durante 7 ciclos productivos, se determinó que la humedad ha sido excesiva durante la mayor parte del tiempo, mientras que la concentración de CO_2 se ha mantenido en el margen de valores recomendados, por lo que la primera variable es claramente más limitante en el clima Atlántico. Por otro lado, la posibilidad de relacionar la humedad relativa con otras variables ambientales es muy limitada, precisamente por los valores medidos, lo que va a proporcionar distribuciones constantes en saturación. Sin embargo, la concentración de CO_2 puede ser inferida mediante su relación con otras variables de más fácil y económica medición, en este caso la temperatura exterior.

Un factor decisivo relacionado con la humedad relativa que nos muestra un grave error en la climatización basada en la temperatura es la incidencia de la humedad en el gasto energético. La humedad relativa se omite frecuentemente en los sistemas de climatización atribuyéndole escasa incidencia en la salud y el balance energético. Si bien, en este trabajo no se ha constatado incidencia en la ganancia de peso de los animales en los ciclos saturados con respecto a otros, sí ha dado lugar a gastos energéticos innecesarios y nada despreciables, pudiendo llegar a un 47% más de energía consumida por kg de cerdo producido. De ahí la gran importancia de esta variable que apunta a que un incremento de la ventilación con la extracción eficaz de la humedad redundaría en una mejora del ambiente interior al tiempo que se reducen los consumos energéticos.

En relación a la concentración de NH_3 , el trabajo se ha centrado en la elaboración de patrones que pueden ser reproducidos fácilmente por controladores avanzados. Así, se han hallado patrones senoidales, con ecuaciones fácilmente trasladables a controladores avanzados. Ello permitiría la estimación de su concentración sin necesidad de incorporar sensores adicionales, lo cual añadiría valor al sistema de control con un coste muy reducido y sin incremento de las exigencias de mantenimiento. Este dato es de gran valía en el control ambiental por la gran importancia de la concentración del NH_3 sobre la salud de los animales, y también de los trabajadores, y, como consecuencia, en la producción.

Por tanto, la combinación de modelos predictivos con la evolución de otras variables, ya sean por medición directa o inferidas, lo cual sería recomendable fundamentalmente para la concentración de NH_3 , mejoraría de forma muy importante el ambiente de cara a mejorar el bienestar animal reduciendo también el consumo energético con sus dos componentes, ambiental y económica.

4.1. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS, PRODUCTIVAS Y AMBIENTALES DE UNA GRANJA DE PRODUCCIÓN DE LECHONES DESTETADOS EN EL NOROESTE DE ESPAÑA

Los mejores resultados para las variables de producción se obtuvieron durante el ciclo III, con las menores temperaturas exteriores e interiores (figuras 7 y 8). El calor suplementario proporcionado por el sistema de control, basado en la temperatura, contribuyó a mantener la zona animal a una temperatura sustancialmente constante, mostrando una débil dependencia de la temperatura exterior. Los bajos coeficientes de correlación de los valores diezminutales entre la temperatura en la zona animal y la temperatura exterior ($R^2 = 0.10$) contrastan con la correlación fuerte y positiva ($R^2 = 0,67$) encontrada por Banhazi *et al.* (2008) en edificios de destete australianos, en este caso sin calefacción suplementaria. Por otra parte, una menor temperatura de consigna provocó una disminución efectiva de la temperatura en la zona animal. Además, los estadísticos analizados revelaron diferencias de temperatura para cada uno de los tres períodos en los que se dividió el ciclo, lo que evidenció los efectos de las distintas fases de crecimiento. Durante el período crítico, la temperatura promedio estuvo, generalmente, por debajo de los 30 - 32 °C recomendados por Muirhead y Alexander (1997) y ocasionalmente por debajo de 26 °C (Le Dividich y Herpin, 1994). Durante los periodos postcrítico y final, la temperatura promedio estuvo por encima de la recomendación de 24° C (Close y Stanier, 1984).

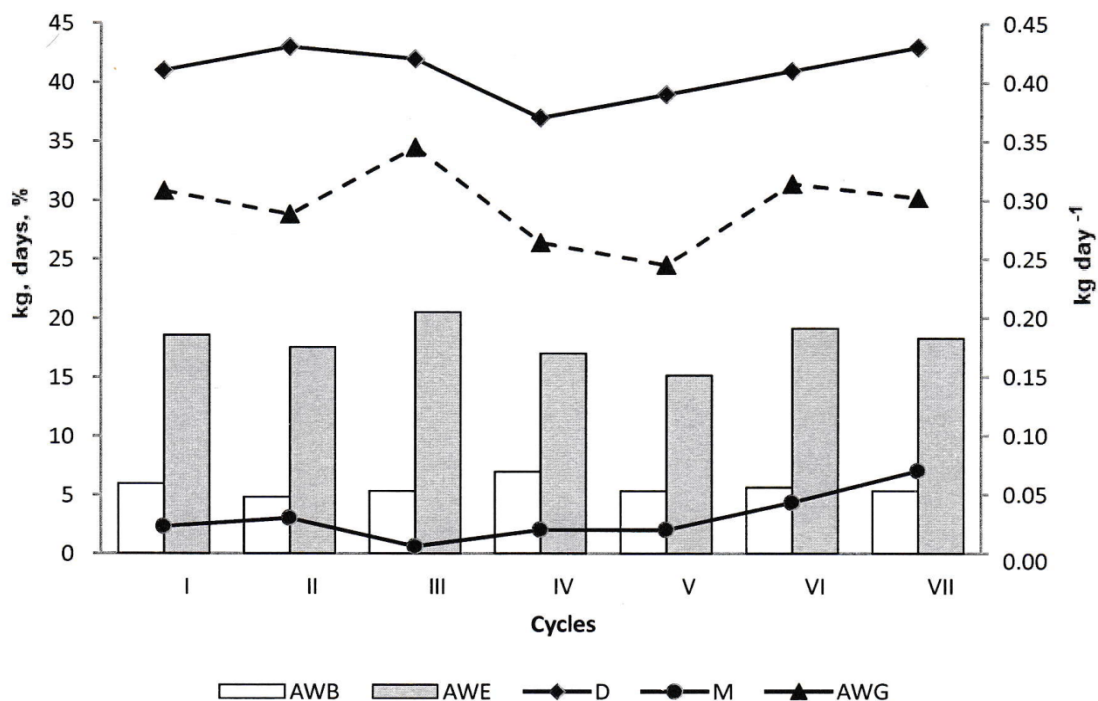


Figura 7. Variables de producción para cada ciclo. AWB: peso medio al inicio del ciclo(kg), AWE: peso medio al final del ciclo (kg), D: duración (días), M: mortalidad (%), AWG: peso medio diario (kg día⁻¹). Fernandez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

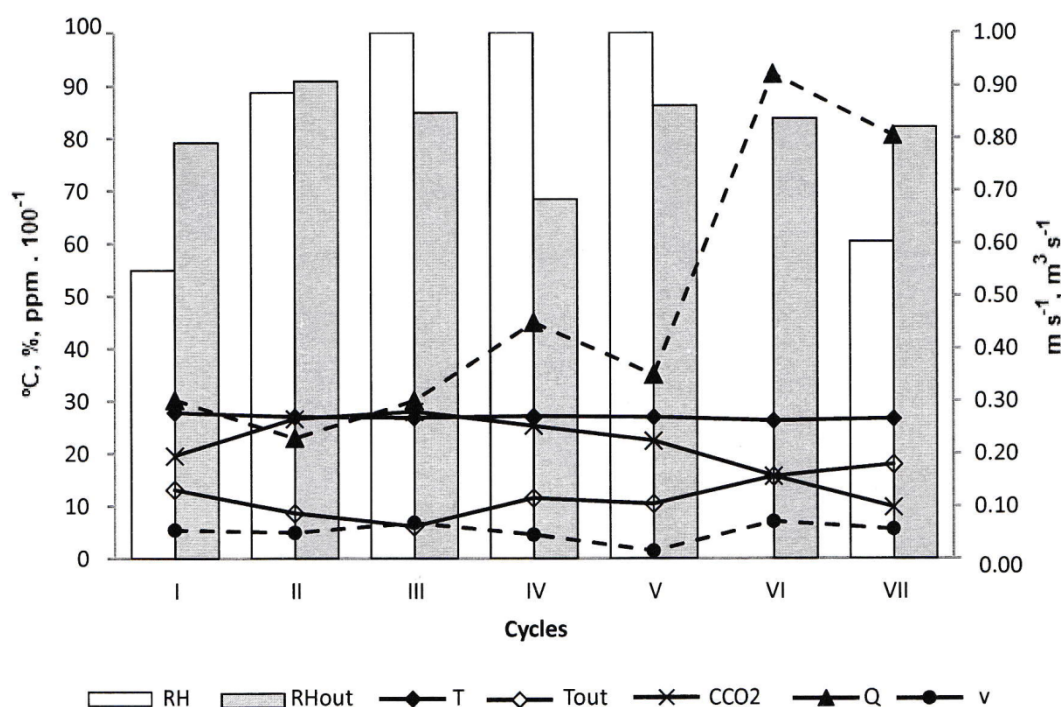


Figura 8. Variables ambientales para cada ciclo. RH: humedad relativa media en la zona animal (%), RHout: humedad relativa media exterior (%), T: temperatura media en la zona animal(°C), Tout: temperatura media exterior (°C), CCO₂: concentración media de CO₂ en la zona animal (ppm · 100⁻¹), Q: caudal medio del aire extraído con ventilador (m³ s⁻¹), v: velocidad media aire en la zona animal (m s⁻¹). Fernandez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

Con el control ambiental basado únicamente en la temperatura, la humedad relativa tuvo un buen comportamiento, según lo indicado por Forcada *et al.*, (2009), solamente en los ciclos I y VII, con valores entre el 50% y el 75% durante el 79,4% y el 91,3% del tiempo, respectivamente (Figura 2). Por el contrario, tres de los ciclos (III, IV y V) estuvieron saturados permanentemente, en parte debido a los altos valores de humedad propios de la zona de clima oceánico donde se encuentra la granja en la que se llevó a cabo la fase experimental del trabajo. Se encontraron resultados similares en Corea para cerdos de cebo, con un peso entre 85 kg y 110 kg, con una humedad relativa media en el alojamiento del 87,3%, donde el sistema de control ambiental tampoco fue capaz de mantener la humedad en los valores recomendados ya que, al igual que en este trabajo, la instalación de control estaba gobernada únicamente por la temperatura del alojamiento (Yeo *et al.*, 2019). En los ciclos no saturados (I y VII), el valor medio de la humedad relativa se fue incrementando a medida que avanzaba el ciclo, obteniéndose valores de R² entre la humedad relativa exterior y en la zona animal de 0.49 y 0.56, respectivamente, acorde con los valores obtenidos por Banhazi, *et al.* (2008). La humedad relativa se comportó de manera diferente a la temperatura, con correlaciones muy bajas entre los valores interiores y exteriores. Este bajo nivel de correlación entre las humedades interior y exterior, en relación con las temperaturas, sugiere la mayor facilidad para el control de la temperatura del aire en el interior del alojamiento que de la humedad relativa.

Las menores y mayores ganancias medias de peso diarias se obtuvieron durante los ciclos saturados (Figura 2), lo que sugiere una baja influencia de la humedad en el crecimiento de los lechones cuando éstos se mantienen dentro de la zona termoneutra, conforme a lo descrito por Guo *et al.* (2001).

Las concentraciones medias de CO₂ por ciclo (Figura a) siguieron una evolución sinusoidal a lo largo del año mostrando una fuerte correlación lineal negativa con la temperatura exterior, con valores de R² de 0,91. Los valores más altos correspondieron a las épocas más frías, lo que se relacionó con las restricciones que las bajas temperaturas exteriores provocan en el funcionamiento del sistema de ventilación (Banhazi *et al.*, 2011; Park *et al.*, 2013). Las concentraciones medias de CO₂ en la zona animal se mantuvieron por debajo de las 3000 ppm recomendadas por Lee *et al.*, (2005). Incluso, en el ciclo VII, no se llegaron a superar las 1540 ppm establecidos por Donham (1991), lo cual está de acuerdo con los valores indicados para la zona de gestación en animales confinados en granjas porcinas por Peters *et al.* (2012). En los ciclos saturados o que están próximos a la saturación (II - V), con flujos de ventilación bajos, las concentraciones de CO₂ fueron directamente proporcionales al peso final de los animales. Por el contrario, en los ciclos I y VII, cuando se extrajo de manera efectiva el CO₂, su concentración tendió a incrementarse a medida que avanzaba el ciclo, o lo que es lo mismo, a medida que los animales incrementaban su peso. Estos resultados indican que la concentración de CO₂ en el alojamiento está relacionadas con la humedad relativa, el funcionamiento del sistema de ventilación y el peso y la edad de los animales.

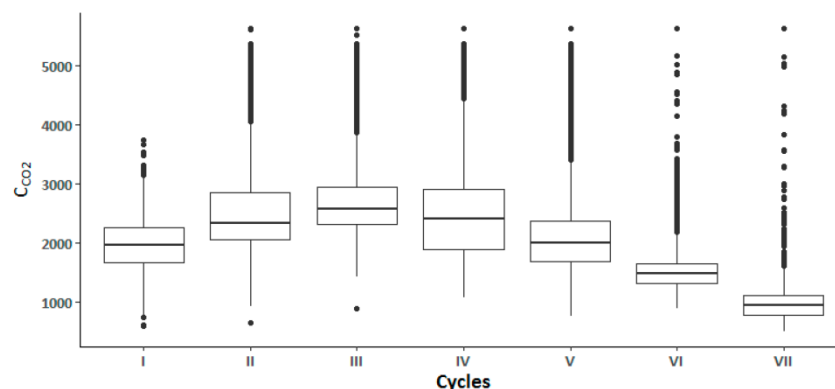


Figura 9. Concentraciones medias de CO₂ en la zona animal zone (C_{CO2}) para cada ciclo analizado. Fernandez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

En cuanto a la energía consumida por el sistema de calefacción (figuras 3 y 4) se observó que con un aumento de 9,52 °C en la temperatura exterior se produjo una reducción en su consumo del 39,96%, lo que coincide con los resultados obtenidos por Alberdi *et al.* (2016) en parideras de ganado porcino, donde los costes operativos totales aumentaron en torno al 4% cuando la temperatura exterior media se redujo en 1 °C. De manera similar, se observó una reducción del 30% en el uso de combustible para calefacción con una reducción de 6° C en el ajuste de la temperatura del alojamiento por la noche. Los mayores consumos de energía térmica se producen en los ciclos saturados (III, IV y V). Esto es debido a que calentar el aire con un elevado nivel de humedad requiere más energía que el aire seco. En particular, durante el ciclo V, con una temperatura exterior media de 10,4 °C la demanda de energía del sistema de calefacción fue un 17% mayor que en el ciclo II, con 8,6 °C de temperatura exterior media. Por lo tanto, las restricciones en el sistema de ventilación pueden provocar un aumento del consumo de la energía de calefacción. En consecuencia, la incorporación de la humedad como variable de entrada en los sistemas de control podría contribuir a mejorar el ambiente en el alojamiento y el mantenimiento de las instalaciones (Lorencena *et al.*, 2020). Esto es debido a que se reducen los altos niveles de humedad, los cuales resultan en condensación y son perjudiciales para la

eficiencia energética de la instalación de calefacción (Schauberger *et al.*, 2000; Van Wagenberg *et al.*, 2005).

El consumo medio diario de energía de las instalaciones de ventilación y calefacción mostraron una correlación lineal negativa, con valores de R^2 de 0,66. Las restricciones en el sistema de ventilación se justificaron por las bajas temperaturas exteriores medidas durante el ciclo III, pero no durante el ciclo V o VI, durante los cuales tales restricciones provocaron la saturación del aire y un aumento en los costos de energía de calefacción. El ahorro energético provocado por la disminución de las tasas de ventilación (20% para los ciclos II y IV) no compensó la mayor demanda de energía de la instalación de calefacción que fue, en promedio, 10 veces mayor. En cerdos de engorde, Xie *et al.* (2019) lograron un ahorro simulado de energía en la instalación de ventilación del 43% mediante la incorporación de un modelo de ecuación de balance de energía al sistema de control.

Como se puede observar en las figuras 10 y 11, los valores de temperatura exterior para cada ciclo mostraron una correlación negativa con el consumo de energía de calefacción, con valores de R^2 de 0,75, pero una fuerte correlación positiva con el consumo de energía de ventilación ($R^2 = 0.54$). El aumento del consumo de energía de ventilación supuso una disminución de las concentraciones de humedad y CO_2 con coeficientes de correlación lineal, R^2 , de 0,91 y 0,61 respectivamente. Asimismo, se encontraron correlaciones lineales entre el consumo de energía de calefacción y la humedad relativa y las concentraciones de CO_2 con valores de R^2 de 0.66 y 0.63, respectivamente.

Un aumento de la temperatura exterior (ciclos I y VI) implicó una disminución de los requisitos energéticos por aumento de peso de lechón. Sin embargo, los requisitos energéticos más altos no se observaron durante los ciclos más fríos, pero sí durante los ciclos IV y V, debido a la saturación del aire (Figura 11). Por lo tanto, la humedad relativa se mostró la como la variable más importante en el consumo de energía, muy por delante de temperatura. Los ciclos IV y V requirieron entre un 33% y un 47% más de energía por kg de cerdo producido que el ciclo II, con una temperatura exterior más baja (8,6 °C frente a 11,5 y 10,4 C, respectivamente).

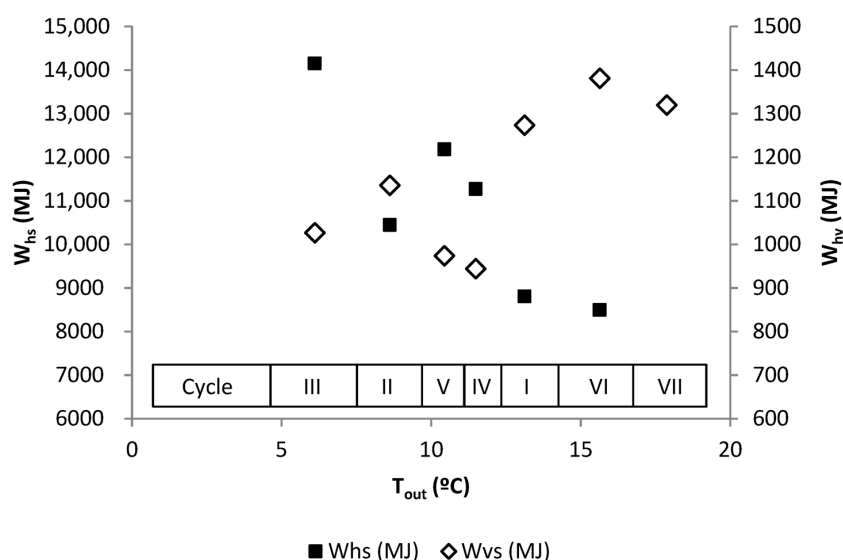


Figura 10. Requerimientos energéticos de las instalaciones de calefacción (W_{hs}) y ventilación (W_{vs}) de cada ciclo en función de la temperatura exterior (T_{out}). Fernandez *et al.* 2020. Autorización:

<https://www.mdpi.com/authors/rights>.

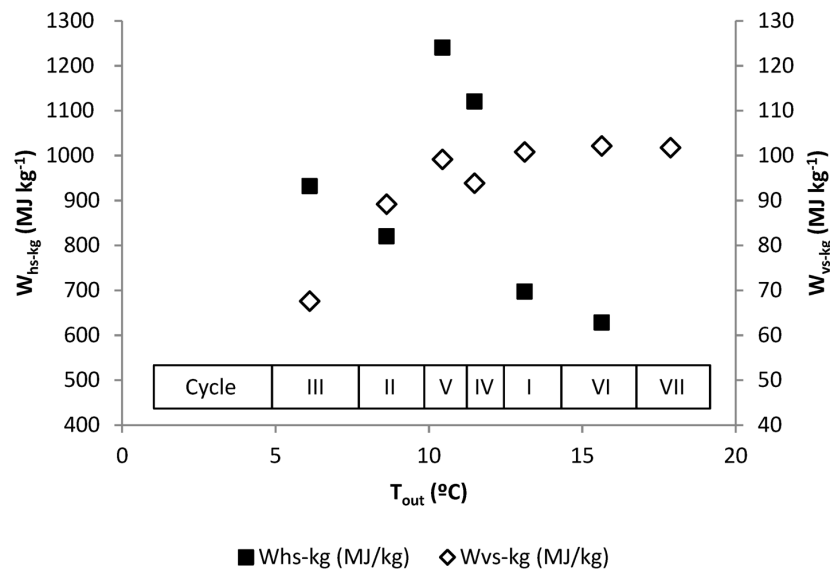


Figura 11. Requerimientos energéticos por ganancia de peso del lechón para las instalaciones de calefacción (W_{hs-kg}) y ventilación (W_{vs-kg}) de para cada ciclo según la temperatura exterior (T_{out}). Fernandez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

Los resultados de las pruebas Brown-Forsythe y Welch y Games-Howell sugirieron que, en general, temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 dentro del alojamiento mostraron importantes diferencias tanto entre ciclos como entre períodos que resultan de los cambios en las condiciones ambientales y de crecimiento. Las concentraciones de CO_2 mostraron variaciones estacionales más marcadas, con una variación anual sinusoidal, inversa a las variaciones de la temperatura exterior.

La comparación entre ciclos saturados y no saturados, con temperaturas exteriores similares, reveló que una mejor gestión de la humedad trajo consigo un ahorro del 17% en energía para el control ambiental del alojamiento durante un ciclo. Esto supuso un ahorro de entre un 33 y un 47% en el consumo energético por kg de cerdo producido.

Recientes investigaciones (Detsch *et al.*, 2018; Yeo *et al.*, 2018; Xie *et al.*, 2019; Besteiro *et al.*, 2017; Ortega *et al.*, 2018) apuntan a la incorporación de técnicas de estimación avanzadas mediante complejos sistemas de control para lograr un ahorro energético o al uso de una gran cantidad de sensores con tecnologías avanzadas para tener en cuenta y mejorar el bienestar animal (Chen y Chen, 2019). Sin embargo, en las granjas porcinas que usan sistemas de control basados en una única sonda de temperatura, la incorporación de la humedad como variable de control va a implicar tasas de ventilación más altas, con consecuencias positivas para el bienestar de los animales, el consumo de energía del sistema de calefacción y la mejora de la productividad, en términos de ganancia de peso por unidad de energía de climatización utilizada, y la vida útil de los equipamientos. Al mismo tiempo, los elevados valores de R^2 obtenidos para la relación entre la energía del sistema de calefacción y la temperatura exterior (0,75), entre la energía del sistema de ventilación y la humedad relativa (0,91) y entre la temperatura exterior y la concentración de CO_2 (0,91) sugieren que estas variables podrían ser fácilmente estimadas por el sistema de control sin costes adicionales de sensores. Además, el empleo de sistemas productivos que aprovecharan las inercias térmicas, serían de gran ayuda en la consecución de mayores eficiencias energéticas de los sistemas. Para ello, son necesarios modelos robustos, ampliamente validados, que den lugar a estimaciones precisas de distintas variables ambientales, donde la temperatura es la más importante.

Sin embargo, la mayoría de los modelos para la predicción de variables ambientales interiores dentro de los alojamientos ganaderos encontrados en la literatura están orientados a estimar la tasa de ventilación necesaria para obtener valores adecuados de temperatura, humedad relativa y concentraciones de contaminantes. Hasta la fecha, los modelos para la predicción de la temperatura interior rara vez han sido validados. Por lo tanto, en la segunda parte de este trabajo se plantea la validación de un modelo de estimación de la temperatura en el interior del alojamiento, en la zona animal, que sea fácilmente incorporable a los sistemas de control ambiental.

4.2. VALIDACIÓN DE UN MODELO ARIMA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL EN UNA EXPLOTACIÓN PORCINA DE LECHONES DESTETADOS

El desarrollo de modelos de predicción que ayuden a comprender la evolución de las variables ambientales puede ser de gran utilidad en el desarrollo de nuevos algoritmos de control ambiental. Estos modelos se pueden utilizar para construir sistemas de control ambiental más efectivos, capaces de actuar en escenarios cambiantes con modelos flexibles y adaptables a las condiciones particulares del momento, anticipando eventos y mostrando una mejor respuesta, lo que puede mejorar el ahorro de energía y el bienestar animal, por lo que resulta fundamental una validación amplia de modelos de estimación. Por ello, en este trabajo se ha realizado la validación de un modelo autorregresivo integrado de media móvil, ARIMA, para la estimación de la temperatura interior en la zona animal, a 40 cm de altura. Realizada la validación sobre los datos obtenidos en una explotación convencional se han obtenido resultados de precisión, comparando las predicciones del modelo con los valores reales obtenidos, y de robustez, comprobando la capacidad de mantener esa precisión al variar las condiciones ambientales y de manejo de los animales.

Al validar el modelo desarrollado en este trabajo se observa una elevada precisión en los diferentes ciclos, con EM entre $-0,05$ y $1,01$ °C, lo que permite afirmar que, a pesar de los cambios en las condiciones de contorno, la precisión se mantiene estable, con muy poca dispersión de valores. Por otra parte, en la literatura científica encontramos numerosas recomendaciones y propuestas de las condiciones de confort de los animales (Le Dividich y Herpin, 1994; Van Wagenberg *et al.*, 2005; Aarnink *et al.*, 2006), ninguna de las cuales establece rangos de temperatura de confort inferiores a 2°C, por lo que la predicción de la temperatura dentro de estos parámetros sería aceptable.

La comparación de la precisión con respecto a otros modelos anteriores con objetivos similares es compleja debido a las condiciones particulares de cada ensayo, los periodos de validación y el tipo de error presentado. No obstante, el modelo aquí presentado es más preciso que el desarrollado por Daskalov (1997) para alojamientos de lechones destetados con ventilación natural, que obtuvo un EM de 1,12°C. La validación del modelo realizada por Daskalov (1997) utilizó 720 registros que consistieron en temperaturas medias medidas en intervalos de 2 minutos durante tres experimentos de 8 h realizados en invierno, verano y primavera, lo que sumó 24 h de mediciones discontinuas. Por el contrario, este modelo está validado sobre siete ciclos productivos completos que suman 292 días.

Otros autores, como Schauburger y Pilati (1998), con un modelo analítico basado en balances de estado estacionario de calor sensible, humedad y CO₂ o Seo *et al.* (2012), con un modelo CFD, obtuvieron EM de $-1,40$ y $-0,68$ °C respectivamente. Otros autores (Cooper *et al.*, 1998; van Wagenberg *et al.*, 2004) han propuesto métodos analíticos obteniendo EM de $0,41$ y $0,83$ °C, respectivamente, similares a los valores obtenidos en este trabajo. Asimismo, Rojano *et al.* (2016), con un modelo computacional de gradiente térmico, y Upachaban *et al.*

(2016) con un modelo físico de balance de calor y humedad, obtuvieron resultados acordes a los presentados en este trabajo.

Las validaciones de los modelos revisados se realizaron por periodos muy cortos y, generalmente, utilizando medidas discontinuas. En contraste, nuestro modelo fue validado durante un período de 292 días, utilizando más de 36.000 registros de mediciones continuas. Excepto por los modelos desarrollados por van Wagenberg *et al.* (2004) y Upachaban *et al.* (2016), el objetivo de los modelos discutidos era predecir la temperatura interior fuera de la zona ocupada por los animales. Sin embargo, la predicción de las temperaturas interiores es más significativa en la zona ocupada por animales, donde se deben garantizar las condiciones adecuadas para el crecimiento.

Las predicciones de este modelo se basan en datos previos de la temperatura interior y las variables predictoras, la temperatura del aire exterior, el área de la sección de salida, el volumen de aire extraído y el peso del animal, pueden ser medidas fácilmente. Además, este método es aplicable porque la determinación de los valores de estas variables es parte de las rutinas de manejo de la granja.

El modelo ha sido desarrollado para unas características del alojamiento y climáticas concretas, lo que limita su uso a las condiciones de validación. Sin embargo, la validación del modelo durante 7 ciclos bajo diferentes condiciones ambientales, regímenes de manejo y períodos de vida animal garantiza la robustez y precisión del mismo, el cual puede adaptarse a las variaciones sustanciales en las exigencias ambientales observadas durante esta etapa de la cría (Dong y Pluske, 2007, Le Dividich y Herpin, 1994), resultado, fundamentalmente, del aumento de peso de los animales en un período de tiempo muy breve. Finalmente, indicar que se trata de un modelo dinámico de respuesta rápida (10 minutos) lo que es de gran utilidad para el análisis y optimización de sistemas de ventilación y calefacción, a pesar de la mayor inercia de la calefacción.

El modelo, por tanto, se considera adecuado para su aplicación durante el ciclo completo de destete en explotaciones convencionales de producción de lechones en climas templados, pero la inclusión de otras variables, además, de la temperatura, resultan de gran interés para la mejora del bienestar animal. Las variables más destacadas para tener en cuenta para su introducción serían las concentraciones de distintos gases contaminantes como el NH_3 o el CO_2 o la humedad relativa. De todas ellas, en el caso de los animales monogástricos, como el cerdo, la concentración de NH_3 sería sin duda la más importante, razón por la que se aborda en la parte final del trabajo.

4.3. EVOLUCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE NH_3 EN NAVES DE LECHONES DESTETADOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE CONSIGNA

El análisis de la evolución diaria de las concentraciones de NH_3 en la zona ocupada por animales, realizado en función de la temperatura de consigna indica que, en general, las concentraciones medias de NH_3 disminuyeron con la temperatura de consigna, oscilando entre 3,79 y 0,30 ppm para 26 y 23 °C, respectivamente. Esta reducción fue mayor cuando la temperatura de consigna se modificó de 25 a 24 °C, debido a que esta reducción de la temperatura de consigna supuso un incremento de la tasa de ventilación. A lo largo de todos los ciclos, las concentraciones de NH_3 se encontraron dentro de los límites establecidos por distintos autores (Krupa, 2003; Schauburger *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2013; Clark y Tilman, 2008).

Diversos autores (Ni *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2011; García-Ramos *et al.*, 2018) han relacionado el efecto de la temperatura de consigna sobre el funcionamiento de la instalación

de ventilación y, en consecuencia, sobre la emisión de NH_3 y, por tanto, sobre la concentración de NH_3 en el alojamiento. Durante aproximadamente las dos primeras semanas de ciclo, que se corresponden con el período crítico definido por Le Dividich y Herpin (1994), las temperaturas de consigna fueron de 26 °C y 25 °C, estando la ventilación muy restringida al reducir la sección de entrada de aire del alojamiento al ventilador, debido a los estrictos requisitos térmicos de los animales y la sensibilidad de los lechones destetados a las corrientes de aire. En consecuencia, las concentraciones más altas de NH_3 se produjeron durante este período. Durante el período poscrítico, cuando ya se ha establecido la ingesta regular de alimentos (Le Dividich y Herpin, 1994), las temperaturas de consigna disminuyeron a 24 y 23 °C, por lo que las restricciones de ventilación fueron menores. Esto provocó una disminución sustancial en la concentración media de NH_3 , pasando de 5,24 ppm durante el período crítico a 1,00 ppm en el período poscrítico. Además, la temperatura del aire en la zona ocupada por animales siempre estuvo por encima de la temperatura de consigna, con variaciones entre 2,07 y 1,56 °C para temperaturas de consigna de 26 y 23 °C, respectivamente, lo que pone de manifiesto la inercia térmica que presenta la instalación de calefacción. Estos hallazgos sugieren una mejor respuesta de la instalación de control ambiental a temperaturas de consigna más bajas.

Por otra parte, y dado que la densidad del NH_3 es menor que la del aire, el NH_3 se va a ubicar en las capas superiores del alojamiento, por lo que es más fácil su extracción que la de otros gases, como el CO_2 , que se concentran en las capas más bajas. En consecuencia, los patrones de concentración de NH_3 van a estar fuertemente influenciados por las tasas de ventilación, las cuales, a su vez, se vieron afectadas por las temperaturas de consigna y disminuyeron a medida que los animales incrementan su edad y, en consecuencia, su peso.

La concentración media de NH_3 y la humedad relativa en el interior del alojamiento mostraron un comportamiento inverso (Figura 12). Esto también fue presentado por Banhazi (2013), quien indicó que los niveles de NH_3 están más estrechamente relacionados con los niveles de evaporación que con las tasas de ventilación y que los niveles de evaporación son máximos a temperaturas más altas.

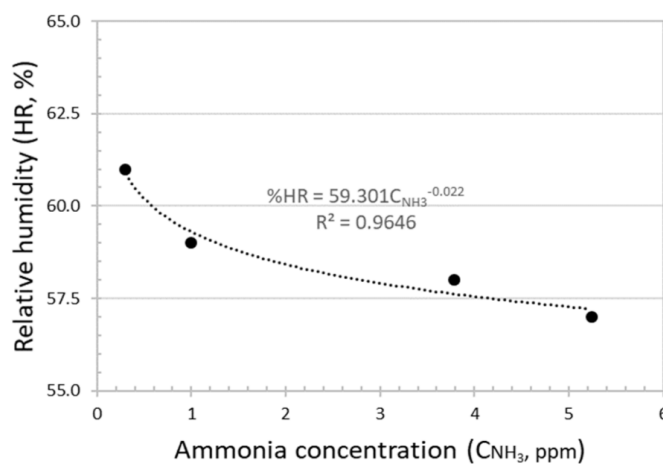


Figura 12. Ajuste exponencial de la concentración de NH_3 y la humedad relativa (HR) en la zona ocupada por animales. Rodríguez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

Concentraciones de NH_3 medidas por distintos autores mostraron resultados más altos que los presentados en este trabajo debido a factores como la edad y el peso del animal (Wang *et al.*, 2011; Banhazi, 2013; Saha *et al.*, 2014), el sistema de ventilación (Zong y Zhang, 2015), el sistema de limpieza (Wang *et al.*, 2011), la ubicación de la granja y el clima (Koerkamp *et al.*, 1998; Banhazi, 2013), o la época del año (Zong y Zhang, 2015; Banhazi, 2013). Los valores obtenidos por estos autores fueron mayores que los obtenidos incluso durante la última fase de

este trabajo, durante la cual las condiciones para los animales, con un peso próximo a los 20 kg, empiezan a ser similares a las condiciones habituales de los cerdos en la fase de cebado, con niveles de NH_3 de $0,30 \pm 0,48$ ppm y una temperatura de consigna de 23 °C.

La evolución diaria de las concentraciones de NH_3 observada en este trabajo difiere considerablemente del patrón observado en condiciones de laboratorio para cerdos en la fase de cebo en granjas con salas ventiladas con sistemas de presión negativa (Wang *et al.*, 2011). Tales diferencias pueden ser debidas, fundamentalmente, a la disponibilidad de diferentes sistemas de ventilación y de limpieza. En el ensayo experimental realizado para este trabajo, el sistema de ventilación forzada eliminó efectivamente el NH_3 al mediodía, evitando así una tendencia de la concentración de NH_3 paralela a la de la temperatura del aire. Además, la remoción diaria de estiércol afectó abruptamente la evolución diaria de la concentración de NH_3 (Wang *et al.*, 2011), lo que no sucedió en este trabajo, ya que la limpieza de las fosas de almacenamiento de purines se realizó al final de cada ciclo.

La evolución diaria de la concentración de NH_3 en las naves de destete mostró un patrón sinusoidal (figura 13), similar al obtenido por Calvet *et al.* (2011a y b) para alojamientos de conejos y de broilers, con valores máximos durante la noche, cuando las tasas de ventilación eran mínimas y valores mínimos durante el día, cuando las tasas de ventilación eran máximas. Por tanto, la respuesta sinusoidal estuvo fuertemente condicionada por las tasas de ventilación en el interior del alojamiento, las cuales estaban controladas exclusivamente por la temperatura interior. Este patrón afectó a la emisión de NH_3 , que siguió la tendencia opuesta a la concentración de NH_3 y aumentó con el aumento de las tasas de ventilación. Como resultado, la emisión de NH_3 fue mayor durante el día (Calvet *et al.*, 2011b; Saha *et al.*, 2014).

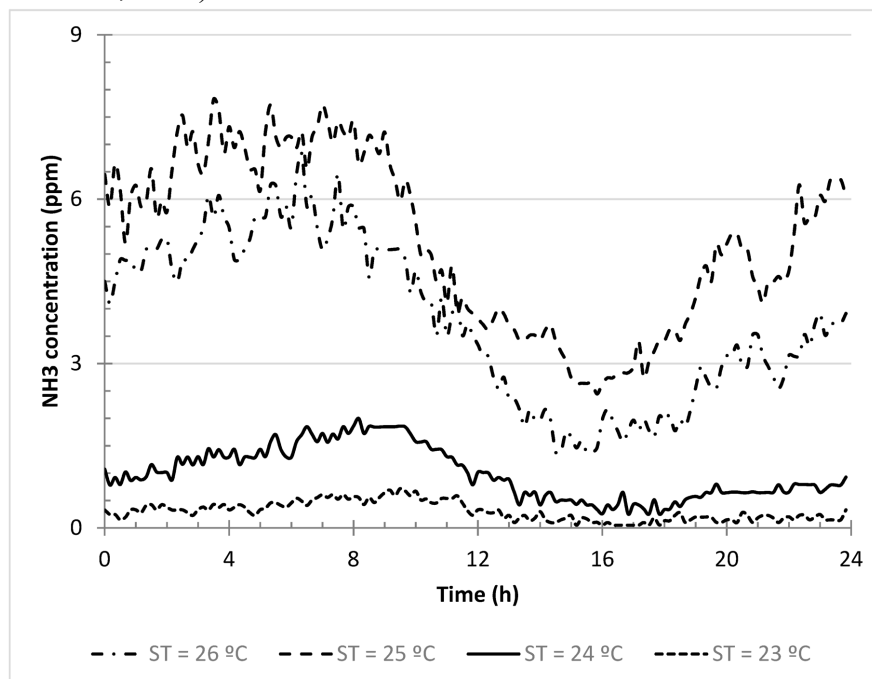


Figura 13. Evolución diaria de la concentración media de NH_3 en la zona ocupada por animales a las temperaturas de consigna analizadas. Fuente: Arango 2017. Autorizado por la autora.

La evolución diaria de la concentración de NH_3 se ajustó a una función de onda sinusoidal por el método de mínimos cuadrados y el método FFT, transformada rápida de Fourier (Figuras 14 y 15). Con la FFT se realizó una descomposición de la serie temporal aditiva (Figura 14),

considerando sólo la componente estacional, determinándose la amplitud (A), el ángulo de fase inicial (ϕ) y el valor promedio (B) de la onda sinusoidal (Figura 15).

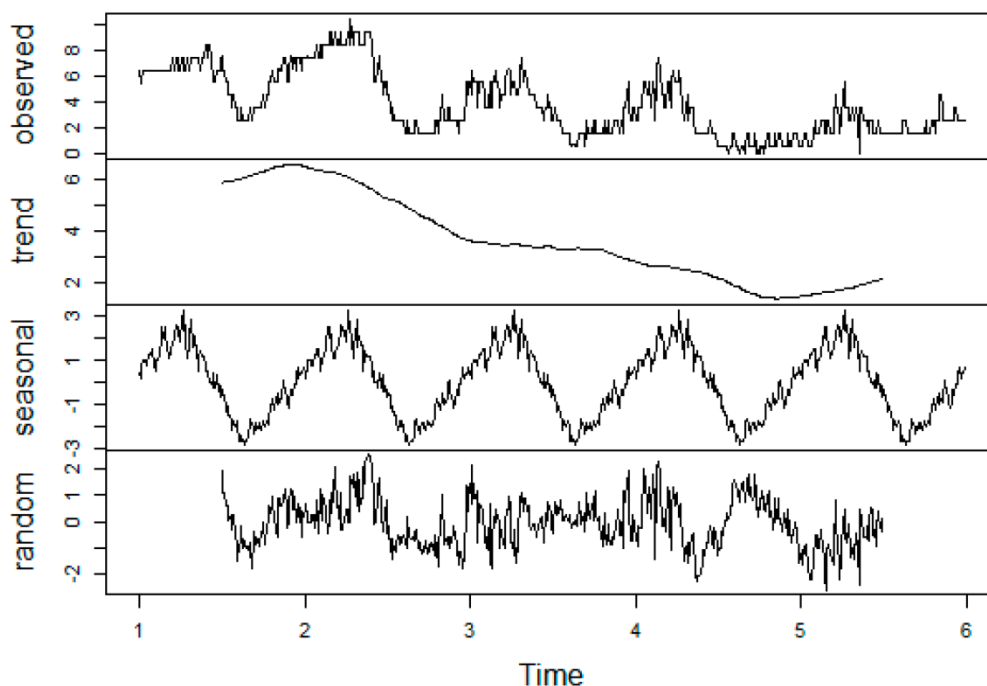


Figura 14. Descomposición de series temporales aditivas. Rodríguez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

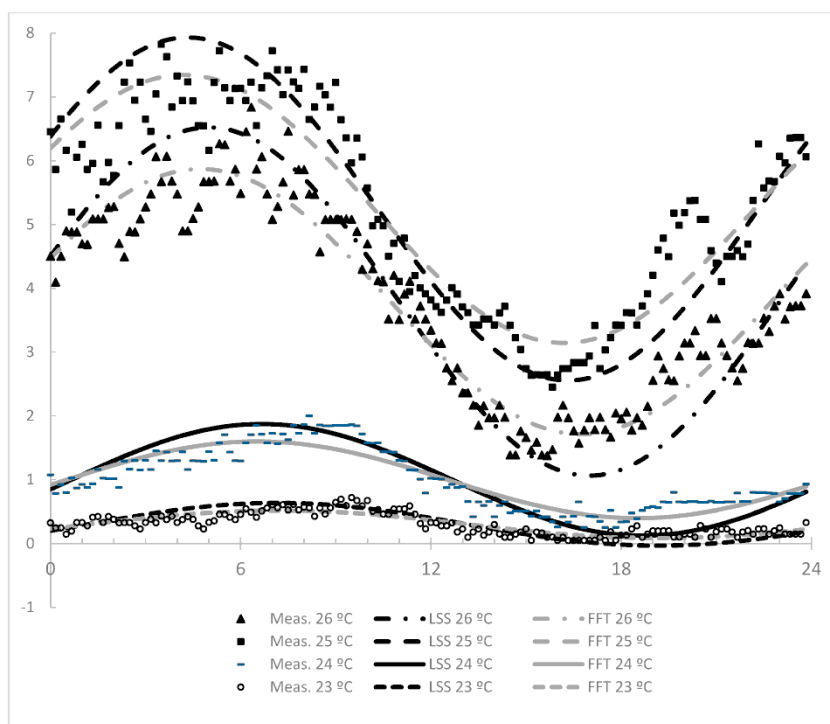


Figura 15. Ajuste sinusoidal medido (Meas.) y modelizado utilizando ajuste de mínimos cuadrados (LSS) y la transformada rápida de Fourier (FFT) para la evolución diaria de la concentración de NH_3 a diferentes temperaturas de consigna. Rodríguez *et al.* 2020. Autorización: <https://www.mdpi.com/authors/rights>.

La amplitud de la función de onda sinusoidal disminuyó con a medida que se reducía la temperatura de consigna. Aunque los valores obtenidos para temperaturas de consigna de 26

°C y 25 °C fueron casi idénticos, tal y como se puede observar en la figura 8, la amplitud de la onda disminuyó drásticamente a temperaturas de consigna más bajas, cuando se permiten tasas de ventilación más altas debido a la menor sensibilidad de los animales a las corrientes de aire. Por su parte, el modelo LSS mostró una mayor amplitud de onda que el modelo FFT en todas las temperaturas de consigna.

La bondad del ajuste de la función se caracterizó por el coeficiente de determinación, R^2 , que mostró valores casi idénticos en ambos métodos. Sin embargo, los valores de SDE y RMSE sugieren una mejor estimación de la evolución de la concentración de NH_3 por FFT que por LSS.

Los resultados obtenidos en este trabajo posibilitan la incorporación de la concentración de NH_3 a los sistemas de control ambiental convencionales mediante la aplicación de un algoritmo sencillo basado en las variables utilizadas por el sistema de control. Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirán a disminuir las repercusiones ambientales de la producción ganadera intensiva y a mejorar el estado de bienestar animal mientras se mantiene la productividad.

5. CONCLUSIONES

La caracterización de una granja de producción de lechones destetados desde el punto de vista productivo, energético y ambiental permitió establecer relaciones entre distintas variables ambientales fácilmente medibles y su adaptación al crecimiento de los lechones a lo largo del ciclo analizado, así como determinar los principales problemas relacionados con el control ambiental.

El control ambiental, basado en la temperatura en el alojamiento, no fue capaz de mantener la humedad relativa en valores adecuados, con períodos prolongados de tiempo en permanente estado de saturación. En consecuencia, los mayores requerimientos energéticos se observaron durante estos ciclos, mostrándose, la humedad relativa, como la variable más importante en el consumo de energía. Por tanto, la incorporación de la humedad como variable de control supondría mayores tasas de ventilación, con consecuencias positivas para el bienestar animal, una reducción del consumo de energía térmica y una mejora de la productividad en términos de ganancia de peso por unidad de energía de climatización utilizada.

Para mejorar la efectividad del control ambiental, su capacidad de anticipación y mejorar su respuesta, se ha validado un modelo estadístico de media móvil integrada autorregresiva (ARIMA) para predecir la temperatura del alojamiento en la zona ocupada por los animales. El modelo generado proporciona una mejora relevante en términos de precisión y fiabilidad debido a su prolongada y continua validación bajo condiciones meteorológicas cambiantes y considerando el funcionamiento de los sistemas de calefacción y ventilación, así como los cambios debido al aumento de la edad y el peso de los animales.

Las concentraciones medias de CO₂ por ciclo siguieron una evolución sinusoidal a lo largo del año y mostraron una fuerte correlación lineal negativa con la temperatura exterior, estando también relacionadas con la humedad relativa, el sistema de ventilación y el peso y la edad de los animales.

No se han encontrado relaciones con otras variables ambientales, pero se han establecido patrones diarios de la concentración de NH₃ en la zona ocupada por animales, asociados a una onda sinusoidal, en función de la temperatura de consigna establecida para el control ambiental. Estos patrones pueden ser incorporados en los sistemas de control convencionales, con la temperatura como única variable de entrada, mediante la aplicación de un algoritmo simple basado en las variables utilizadas por el sistema de control climático.

Las altas correlaciones lineales obtenidas para las relaciones entre la energía del sistema de calefacción y la temperatura exterior, la humedad relativa y la concentración de CO₂; entre la energía del sistema de ventilación y la humedad relativa y entre la temperatura exterior y la concentración de CO₂ sugieren que determinadas variables podrían estimarse fácilmente mediante el sistema de control sin necesidad de incorporar nuevos sensores al sistema.

Con ello se pueden desarrollar nuevas estrategias de control de bajo coste, fácilmente implementables en granjas convencionales en áreas con clima oceánico. Dichas estrategias contribuirán al logro del máximo rendimiento con el menor uso posible de recursos, centrándose, al mismo tiempo, en el ahorro energético, la eficiencia productiva y el bienestar animal.

Como resultado, los sistemas de control ambiental contribuirán a reducir la demanda de recursos y disminuir el impacto ambiental de la producción ganadera, mejorando el ahorro energético, la eficiencia productiva y el bienestar animal.

6. REFERENCIAS

- Aarnink, A. J. A. *et al.* “Temperature and body weight affect fouling of pig pens”, *Journal of Animal Science*, **2006**, 84(8), pp. 2224-2231. doi: 10.2527/jas.2005-521.
- Alberdi, O.; Arriaga, H.; Calvet, S.; Estellés, F.; Merino, P. “Ammonia and greenhouse gas emissions from an enriched cage laying hen facility”. *Biosystems Engineering*, **2016**, *144*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.009>
- Arango, T. Caracterización e interacción de variables ambientales en el interior de alojamientos porcinos de transición en el noroeste peninsular. Tesis Doctoral. **2017**.
- Axaopoulos, P.; Panagakis, P.; Kyritsis, S. “Computer simulation assessment of the thermal microenvironment of growing pigs under summer conditions”. *Transactions of the ASABE*, **1992**, *35*(3), 1005e1009. doi: 10.13031/2013.28694
- Banhazi, T.; Seedorf, J.; Rutley, D.; Pitchford, W. “Identification of risk factors for sub-optimal house conditions in Australian piggeries: Part 2. Airborne Pollutants”. *Journal of Agricultural Safety Health*, **2008**, *14*, 21–39. doi: 10.13031/2013.24122
- Banhazi, T.M. “Seasonal, diurnal and spatial variations of environmental variables in Australian livestock buildings”. *Australian Journal of Multidisciplinary Engineering*, **2013**, *10*, 60–69. <http://dx.doi.org/10.7158/N12-AE13.2013.10.1>
- Banhazi, T.M.; Seedorf, J.; Rutley, D.L.; Pitchford, W.S. “Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 3. Environmental parameters”. *Journal of Agricultural Safety Health*, **2008**, *14*, 41–52. doi: 10.13031/2013.24121
- Banhazi, T.M.; Stott, P.; Rutley, D.; Blanes-Vidal, V.; Pitchford, W. “Air exchanges and indoor carbon dioxide concentration in Australian pig buildings: Effect of housing and management factors”. *Biosystems Engineering*, **2011**, *110*, 272–279. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.08.007
- Besteiro, R.; Ortega, J. A.; Arango, T.; Rodriguez, M. R.; Fernandez, M. D. “ARIMA modeling of animal zone temperature in weaned piglet buildings: Design of the model”. *Transactions of the ASABE*, **2017**, *60*(6), 2175-2183. doi: 10.13031/trans.12372
- Besteiro, R.; Arango, T.; Ortega, J.A.; Rodríguez, M.R.; Fernández, M.D.; Velo, R. “Prediction of carbon dioxide concentration in weaned piglet buildings by wavelet neural network models”. *Computers and Electronics in Agriculture*, **2017**, *143*, 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.025>
- Besteiro, R.; Ortega, J.A.; Arango, T.; Rodriguez, M.R.; Fernandez, M.D. “ARIMA modelling of animal-zone temperature in weaned piglet buildings: Design of the model.” *Transactions of the ASABE*, *60*, **2017**, 1–9. doi: 10.13031/trans.12372
- Blanes-Vidal, V.; Hansen, M.N.; Pedersen, S.; Rom, H.B. “Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow”. *Agriculture Ecosystems and Environment*, **2008**, *124*, 237–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.10.002>

- Blanes–Vidal, V.; Nadimi, E.S.; Ellermann, T.; Andersen, H.V.; Løfstrøm, P. “Perceived; Annoyance from environmental odors and association with atmospheric ammonia levels in non–urban residential communities: A cross–sectional study”. *Environment and Health*, **2012**, *11*, 11–27. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-11-27>
- Blanes, V.; Pedersen, S. “Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations”. *Biosystems Engineering*, **2005**, *92*(4), 483–493. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.002>
- Bottcher, R.; Mathis, S.; Roberts, J. Monitoring air quality with instruments. In *Proceedings of the North Carolina Healthy Hogs Seminar*; North Carolina Cooperative Extension Service: Raleigh, NC, USA, **2001**; p. 10.
- Brown, M.B.; Forsythe, A.B. “Robust tests for the equality of variances”. *Journal of American Statistical Association*, **1974**, *69*, 364–367. doi: 10.1080/01621459.1974.10482955
- Calvet, S.; Cambra–López, M.; Estellés, F.; Torres, A.G. “Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms”. *World Rabbit Science*, **2011**, *19*, 49–61. <https://doi.org/10.4995/wrs.2011.802>
- Calvet, S.; Cambra–López, M.; Estellés, F.; Torres, A.G. “Characterization of gas emissions from a Mediterranean broiler farm”. *Poultry Science*, **2011**, *90*, 534–542. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-01037>
- Cargill, C.; Murphy, T.; Banhazi, T. “Hygiene and air quality in intensive housing facilities in Australia”. *Animal Production in Australia*, **2002**, *24*, 387–393.
- Chen, C.; Liu, X. “An intelligent monitoring system for a pig breeding environment based on a wireless sensor network”. *International Journal of Sensor Networks*, **2019**, *29*, 275–283. doi: 10.1504/IJSNET.2019.098559
- Chen, C.S.; Chen, W.C. “Research and development of automatic monitoring system for livestock farms”. *Applied Sciences*, **2019**, *9*, 1132. <https://doi.org/10.3390/app9061132>
- Cheng, Z.; O’Connor, E.A.; Jia, Q.; Demmers, T.G.M.; Wathes, C.M.; Wathes, D.C. “Chronic ammonia exposure does not influence hepatic gene expression in growing pigs”. *Animal*, **2014**, *8*, 331–337. <https://doi.org/10.1017/S1751731113002127>
- Clark, C.M.; Tilman, D. “Loss of plant species after chronic low–level nitrogen deposition to prairie grasslands”. *Nature*, **2008**, *451*, 712–715. <https://doi.org/10.1038/nature06503>
- Close, W.H.; Stanier, M.W. “Effects of plane of nutrition and environmental temperature on the growth and development of the early-weaned piglet. 2. Energy metabolism”. *Animal Science*, **1984**, *38*, 221–231. <https://doi.org/10.1017/S000335610000221X>
- Cooper, K.; Parsons, D. J.; Demmers, T. “A thermal balance model for livestock buildings for use in climate change studies”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1998**, *69*(1), 43–52. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0223>
- Daskalov, P. I. “Prediction of temperature and humidity in a naturally ventilated pig building”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1997**, *68*(4), 329–339. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0211>
- Daskalov, P.I.; Arvanitis, K.G.; Pasgianos, G.D.; Sigrimis, N.A. “Non-linear Adaptive Temperature and Humidity Control in Animal Buildings”, *Biosystems Engineering*, **2006**. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.09.061>

- Datacomex, Agencia Estatal de Administración Tributaria (AEAT). “Exportaciones del sector porcino 2017-2019”. Subdirección General de Productos Ganaderos. (MAPA) *El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales Indicadores Económicos 2019*, Subdirección general de de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, Dirección General de producciones y Mercados Agrarios. Catálogo de Publicaciones de la administración General del Estado. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>. Madrid, Spain, **2020**; 8.
- De Sousa, P. and Pedersen, S. “Ammonia emission from fattening pig houses in relation to animal activity and carbon dioxide production”, *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, VI (Manuscript BC04 003) **2004**, PP. 1-13.
- Detsch, D.T.; Conti, D.; Diniz-Ehrhardt, M.A.; Martínez, J.M. “On the controlling of temperature: A proposal for a real-time controller in broiler houses”. *Sci. Agric.*, **2018**, 75, 445–451. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0456>
- Di Pasquale, J.; Nannoni, E.; Sardi, L.; Rubini, G.; Salvatore, R.; Bartoli, L.; Adinolfi, F.; Martelli, G. “Towards the Abandonment of Surgical Castration in Pigs: How is Immunocastration Perceived by Italian Consumers?”. *Animals*, **2019**, 9, 198. <https://doi.org/10.3390/ani9050198>
- Diesch, M. A.; Froehlich, D. P. “Production and environmental simulations in livestock housing”. *Transactions of the ASABE*, **1988**, 31(5), 1532e1539. doi: 10.13031/2013.30896
- Doltz, N.; Babot, D.; Álvarez-Rodríguez, J.; Forcada, F. “Improving the environment for weaned piglets using polypropylene fabrics above the animals in cold periods”. *International Journal of Biometeorology*, **2015**, 59, 1839–1847. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-015-0991-0>
- Dong, G. Z.; Pluske, J. R. “The low feed intake in newly- weaned pigs: Problems and possible solutions”. *Asian- Australasian Journal of Animal Sciences*, **2007**, 20(3), 440e452. <https://doi.org/10.5713/ajas.2007.440>
- Donham, K.; Thorne, P.; Breuer, G.; Powers, W.; Marquez, S.; Reynolds, S. “Exposure limits related to air quality and risk assessment”. In *Iowa Concentrated Animal Feeding Operations Air Quality Study*; Iowa State University and The University of Iowa Study Group: Ames, IA, USA, **2002**; p. 164.
- Donham, K.J. “Association of environmental air contaminants with disease and productivity in swine”. *American Journal of Veterinary Research*, **1991**, 52, 1723–1730.
- Forcada, F.; Babot, D.; Vidal, A.; Buxadé, C. “Ganado Porcino. Diseño de Alojamientos e Instalaciones, 1st ed.”; Servet: Zaragoza, Spain, **2009**; pp. 38–70. ISBN: 978-84-92569-07-6
- Fournel, S.; Rousseau, A.N.; Laberge, B. “Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming”. *Biosystems Engineering*, **2017**, 155, 96–123. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.12.005>
- García-Ramos, F.J.; Aguirre, A.J.; Barreiro, P.; Horcas, E.; Boné, A.; Vidal, M. “Applicability of Ammonia Sensors for Controlling Environmental Parameters in Accommodations for Lamb Fattening”. *Journal of Sensors*, **2018**, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4032043>

- Geels, C.; Andersen, H.V.; Ambelas, S.C.; Christensen, J.H.; Ellermann, T.; Løfstrøm, P.; Gyldenkærne, S.; Brandt, J.; Hansen, J.B.; Frohn, L.M.; *et al.* “Improved modelling of atmospheric ammonia over Denmark using the coupled modelling system DAMOS”. *Biogeosciences*, **2012**, 9, 2625–2647. <https://doi.org/10.5194/bg-9-2625-2012>
- Gilbert, H.; Ruesche, J.; Muller, N.; Billon, Y.; Begos, V.; Montagne, L. “Responses to weaning in two pig lines divergently selected for residual feed intake depending on diet”. *Journal of Animal Science*, **2019**, 97, 43–54. <https://doi.org/10.1093/jas/sky416>
- Guo, H.; Lemay, S.P.; Barber, E.M.; Crowe, T.G.; Chénard, L. “Humidity control for swine buildings in cold climate. Part II: Development and evaluation of a humidity controller”. *Canadian Biosystems Engineering*, **2001**, 43, 37–46.
- Hamilton, T.D.C.; Roe, J.M.; Hayes, C.M.; Webster, A.J.F. “Effects of ammonia inhalation and acetic acid pretreatment on colonization kinetics of toxigenic *Pasteurella multocida* within upper respiratory tracts of swine”. *Journal of Clinical Microbiology*, **1998**, 36, 1260–1265. <https://doi.org/10.1128/JCM.36.5.1260-1265.1998>
- Hamon, L.; Andrés, Y.; Dumont, E. “Aerial pollutants in swine buildings: A review of their characterization and methods to reduce them”. *Environmental Science & Technology*, **2012**, 46, 12287–12301. <https://doi.org/10.1021/es3025758>
- Hendriks, C.; Kranenburg, R.; Kuenen, J.; van Gijlswijk, R.; Kruit, R.W.; Segers, A.; Van der Gon, H.D.; Schaap, M. “The origin of ambient particulate matter concentrations in the Netherlands”. *Atmospheric Environment*, **2013**, 69, 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.12.017>
- Hinz, T.; Linke, S.A. “Comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 1: Methods”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1998**, 70, 111–118. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0282>
- Huynh, T.T.T.; Aarnink, A.J.A.; Gerrits, W.J.J.; Heetkamp, M.J.H.; Canh, T.T.; Spoolder, H.A.M.; Kemp, B.; Verstegen, M.W.A. “Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity”. *Applied Animal Behaviour Science*, **2005**, 91, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2004.10.020>
- International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering. CIGR 4th Report of working group climatization of animal houses: Heat and moisture production. In *The International Commission of Agricultural Engineering, Section II*; Research Centre Bygholm: Horsens, Denmark; Danish Institute of Agricultural Sciences: Tjele, Denmark, **2002**.
- Kim, K.Y.; Ko, H.J.; Lee, K.J.; Park, J.B.; Kim, C.N. “Temporal and spatial distributions of aerial contaminants in an enclosed pig building in winter”. *Environmental Research*, **2005**, 99, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2004.10.004>
- Koerkamp, P.G.; Metz, J.H.M.; Uenk, G.H.; Phillips, V.R.; Holden, M.R.; Sneath, R.W.; Short, J.L.; White, R.P.; Hartung, J.; Seedorf, J.; Schröder, J.; Linkert, K.H.; Pedersen, S.; Takai, H.; Johnsen, J.O.; Wathes, C.M. “Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **1998**, 70, 79–95. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0275>

- Krupa, S.V. “Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: A review”. *Environmental Pollution*, **2003**, 124, 179–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)
- Lambert, M.; Lemay, S. P.; Barber, E. M.; Crowe, T. G.; Chenard, L. “Humidity control for swine buildings in cold climate- Part I: Modelling of three control strategies”. *Canadian Biosystems Engineering*, **2001**, 43, 5.29–5.36.
- Le Dividich, J.; Herpin, P. “Effects of climatic conditions on the performance, metabolism and health status of weaned piglets: A review”. *Livestock Production Science*, **1994**, 38, 79–90. [https://doi.org/10.1016/0301-6226\(94\)90052-3](https://doi.org/10.1016/0301-6226(94)90052-3)
- Lee, C.; Giles, L.R.; Bryden, W.L.; Downing, J.L.; Owens, P.C.; Kirby, A.C.; Wynn, P.C. “Performance and endocrine responses of group-housed weaner pigs exposed to the air quality of a commercial environment”. *Livestock Production Science*, **2005**, 93, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.livprodsci.2004.10.003>
- Li, N.; Zhu, C.; Liu, C.; Zhang, X.; Ding, J.; Zandi, P.; Li, H. “The persistence of antimicrobial resistance and related environmental factors in abandoned and working swine feedlots”. *Environmental Pollution*, **2019**, 255, 113116. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113116>
- Liberati, P.; Zappavigna, P. “A dynamic computer model for optimization of the internal climate in swine housing design”. *Transactions of the ASABE*, **2007**, 50(6), 2179e2188. doi: 10.13031/2013.24093
- Liu, X.; Zhang, Y.; Han, W.; Tang, A.; Shen, J.; Cui, Z.; Vitousek, P.; Erisman, J.W.; Goulding, K.; Christie, P.; *et al.* “Enhanced nitrogen deposition over China”. *Nature*, **2013**, 494, 459–462. <http://dx.doi.org/10.1038/nature11917>
- Lorencena, M.C.; Southier, L.F.P.; Casanova, D.; Ribeiro, R.; Teixeira, M. “A framework for modelling, control and supervision of poultry farming”. *International Journal of Production Research*, **2020**, 58, 3164–3179. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630768>
- Lu, X.; Zhang, M.; Zhao, L.; Ge, K.; Wang, Z.; Jun, L.; Ren, F. “Growth performance and post-weaning diarrhea in piglets fed a diet supplemented with probiotic complexes”. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, **2018**, 28, 1791–1799. <https://doi.org/10.4014/jmb.1807.07026>
- MeteoGalicia. Disponible online: https://www.meteogalicia.gal/observacion/estaciones/estaciones.action?request_locale=gl# (consulta el 8 enero 2019).
- Muirhead, M.R.; Alexander, T.J.L. “Managing health and disease. In Managing Pig Health and de Treatment of Disease: A Reference for the Farm”; 5M Enterprises: Sheffield, UK, **1997**; pp. 55–104. ISBN: 9780953015009
- Ni, J.Q.; Heber, A.J.; Darr, M.J.; Lim, T.T.; Diehl, C.A.; Bogan, B.W. “Air quality monitoring and on-site computer system for livestock and poultry environment studies”. *Transactions of the ASABE*, **2009**, 52, 937–947. doi: 10.13031/2013.27391
- Ni, J.Q.; Heber, A.J.; Lim, T.T. “Ammonia and hydrogen sulphide in swine production”. In *Air Quality and Livestock Farming*; CRC Press: Florida, FA, USA, **2018**; pp. 69–88. eBook ISBN 9781315738338

- Noya, I.; Villanueva-Rey, P.; González-García, S.; Fernandez, M.D.; Rodriguez, M.R.; Moreira, M.T. “Life Cycle Assessment of pig production: A case study in Galicia”, *Journal of Cleaner Production*, **2017**, 142, pp 4327-4338. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.160.
- O’Connor, E.A.; Parker, M.O.; McLeman, M.A.; Demmers, T.G.; Lowe, J.C.; Cui, L.; Davey, E.L.; Owen, R.C.; Wathes, C.M.; Abeyesinghe, S.M. “The impact of chronic environmental stressors on growing pigs, *Sus scrofa* (Part 1): Stress physiology, production and play behaviour”. *Animal*, **2010**, 4, 1899–1909. doi: 10.1017/S1751731110001084.
- Oficina estadística de la Unión Europea (EUROSTAT). “Producción de carne de cerdo en la UE durante el año 2019”. *El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales Indicadores Económicos 2019*, Subdirección general de de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, Dirección General de producciones y Mercados Agrarios. Catálogo de Publicaciones de la administración General del Estado. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>. Madrid, Spain, **2020**; 2-3.
- Ortega, J.A. Estudio del ambiente interior de alojamientos para ganado porcino en fase de transición y su modelizado ARIMA. Tesis Doctoral. **2015**.
- Ortega, J.A.; Losada, E.; Besteiro, R.; Arango, T.; Ginzo-Villamayor, M.J.; Velo, R.; Fernández, M.D.; Rodríguez, M.R.; “Validation of an AutoRegressive Integrated Moving Average model for the prediction of animal zone temperatura in a weaned piglet building”, *Biosystems Engineering*, **2018**. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012>
- Pardo-Merino, A.; Ruiz, M.A. “Análisis de Datos con SPSS 13 Base”; *Mc Graw-Hill*: Madrid, Spain, **2005**; pp. 272–367.
- Park, J.H.; Peters, T.M.; Altmaier, R.; Sawvel, R.A.; Anthony, T.R. “Simulation of air quality and cost to ventilate swine farrowing facilities in winter”. *Computers and Electronics in Agriculture*, **2013**, 98, 136–145. doi: 10.1016/j.compag.2013.08.003
- Peters, T.M.; Anthony, T.R.; Taylor, C.; Altmaier, R.; Anderson, K.; O’shaughnessy, P.T. “Distribution of particle and gas concentrations in swine gestation confined animal feeding operations”. *Annals of Occupational Hygiene*, **2012**, 56, 1080–1090. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes050>
- Philippe, F.X.; Cabaraux, J.F.; Nicks, B. “Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques”. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **2011**, 141, 245–260. doi:10.1016/j.agee.2011.03.012
- Philippe, F.X.; Nicks, B. “Review on greenhouse gas emissions from pig houses: Production of carbon dioxide, methane and nitrous oxide by animals and manure”. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **2015**, 199, 10–25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.015>
- Raynor, P.C.; Engelman, S.; Murphy, D.; Ramachandran, G.; Bender, J.B.; Alexander, B.H. “Effects of gestation pens versus stalls and wet versus dry feed on air contaminants in swine production”. *Journal of Agromedicine*, **2018**, 23, 40–51. <https://doi.org/10.1080/1059924X.2017.1387633>

- Registro General de Explotaciones Ganaderas (REGA). “Número de explotaciones de ganado porcino por sistema productivo”. *El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales Indicadores Económicos 2019*, Subdirección general de de Producciones Ganaderas y Cinegéticas. Catálogo de Publicaciones de la administración General del Estado. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>. Madrid, Spain, 2020; 20.
- Rojano, F.; Bournet, P. E.; Hassouna, M.; Robin, P.; Kacira, M.; Choi, C. Y. “Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house”. *Biosystems Engineering*, 2016, 151, 273-285. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.012>
- Saha, C.K.; Ammon, C.; Berg, W.; Fiedler, M.; Loebstin, C.; Sanftleben, P.; Brunsch, R.; Amon, T. “Seasonal and diel variations of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy building and the associated factors influencing emissions”. *Science of the Total Environment*, 2014, 468, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.015>
- Saha, C.K.; Zhang, G.; Kai, P.; Bjerg, B. “Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room”. *Biosystems Engineering*, 2010, 105, 279-287. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.11.006
- Schauberger, G.; Pilati, P. “Evaluation of a steady-state balance model to simulate the indoor climate in livestock buildings: A comparison with measurements of a cattle house”. *Wiener Tierärztliche Monatsschrift*, 1998, 85(2), 49-55.
- Schauberger, G.; Piringer, M.; Mikovits, C.; Zollitsch, W.; Hörtenhuber, S.J.; Baumgartner, J.; Niebuhr, K.; Anders, I.; Andre, K.; Hennig-Pauka, I.; *et al.* “Impact of global warming on the odour and ammonia emissions of livestock buildings used for fattening pigs”. *Biosystems Engineering*, 2018, 175, 106-114. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.09.001>
- Schauberger, G.; Piringer, M.; Petz, E. “Diurnal and annual variation of odour emission from animal houses: A model calculation for fattening pigs”. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, 74, 251-259. <https://doi.org/10.1006/jaer.1999.0457>
- Schauberger, G.; Piringer, M.; Petz, E. “Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs”. *International Journal of Biometeorology*, 2000, 43, 154-162. <https://doi.org/10.1007/s004840050002>
- Seo, I. H.; Lee, I. B.; Moon, O. K.; Hong, S. W.; Hwang, H. S.; Bitog, J. P.; *et al.* “Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals”. *Biosystems Engineering*, 2012, 111(1), 91-106. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.012>
- Soldatos, A.G.; Arvanitis, K.G.; Daskalov, P.I.; Pasgianos, G.D.; Sigrimis, N.A. “Nonlinear robust temperatura-humidity control in livestock buildings”, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, pp. 358-374. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.08.008>
- Subdirección General de Análisis, Coordinación y Estadística del MAPA. “Censo de Ganado porcino en España por CCAA 2019”. *El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales Indicadores Económicos 2019*, Subdirección general de de Producciones Ganaderas y Cinegéticas, Dirección General de producciones y Mercados Agrarios.

- Catálogo de Publicaciones de la administración General del Estado. <http://publicacionesoficiales.boe.es/>. Madrid, Spain, **2020**; 30.
- Sun, G. *et al.* “Forecasting daily source air quality using multivariate statistical analysis and radial basis function networks”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, **2008**, 58 (12), pp. 1571-1578. doi: 10.3155/1047-3289.58.12.1571.
- Takai, H.; Nimmermark, S.; Banhazi, T.; Norton, T.; Jacobson, L.D.; Calvet, S.; Hassouna, M.; Bjerg, B.; Zhang, G.Q.; Pedersen, S.; *et al.* “Airborne pollutant emissions from naturally ventilated buildings: Proposed research directions”. *Biosystems Engineering*, **2013**, 116, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.12.015>
- Upachaban, T.; Khongsatit, K.; Radpukdee, T. “Mathematical model and simulation study of a closed-poultry house environment”. *Mechanical Engineering*, **2016**, 7, 1246-1252. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v7i7.4744>
- Van Ransbeeck, N.; Van Langenhove, H.; Van Weyenberg, S.; Maes, D.; Demeyer, P. “Typical indoor concentrations and emission rates of particulate matter at building level: A case study to setup a measuring strategy for pig fattening facilities”. *Biosystems Engineering*, **2012**, 111, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.12.004>
- Van Wagenberg, A. V.; de Leeuw, M. T. J. “Measurement of air velocity in animal occupied zones using an ultrasonic anemometer”. *Applied Engineering in Agriculture*, **2003**, 19(4), 499-508. doi: 10.13031/2013.14922
- Van Wagenberg, A. V.; Bjerg, B.; Bot, G. P. A. “Measurements and simulation of climatic conditions in the animal occupied zone in a door ventilated room for piglets”. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*, VI. **2004**, Manuscript BC 03 020.
- Van Wagenberg, A.V.; Metz, J.H.M.; den Hartog, L.A. “Methods for evaluation of the thermal environment in the animal-occupied zone for weaned piglets”. *Transactions of the ASABE*, **2005**, 48, 2323–2332. doi: 10.13031/2013.20096
- Vincek, D.; Sabo, K.; Kusec, G.; Kralik, G.; Durkin, I.; Scitovski, R. “Modeling of pig growth by s-function-least absolute deviation approach for parameter estimation”. *Archives of Animal Breeding*, **2012**, 55(4), 364-374. <https://doi.org/10.5194/aab-55-364-2012>
- Von Borell, E.; Özpınar, A.; Eslinger, K.M.; Schnitz, A.L.; Zhao, Y.; Mitloehner, F.M. “Acute and prolonged effects of ammonia on hematological variables, stress responses, performance, and behavior of nursery pigs”. *Journal of Swine Health and Production*, **2007**, 15, 137–145.
- Wang, K.; Wei, B.; Zhu, S.; Ye, Z. “Ammonia and odour emitted from deep litter and fully slatted floor systems for growing–finishing pigs”. *Biosystems Engineering*, **2011**, 109, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.04.001>
- Wathes, C.M.; Demmers, T.G.M.; Teer, N.; White, R.P.; Taylor, L.L.; Bland, V.; Jones, P.; Armstrong, D.; Greshan, A.C.J.; Hartung, J.; *et al.* “Production responses of weaned pigs after chronic exposure to airborne dust and ammonia”. *Animal Science*, **2004**, 78, 87–97. <https://doi.org/10.1017/S135772980005387X>

- Webb, J.; Menzi, H.; Pain, B.F.; Misselbrook, T.H.; Dämmgen, U.; Hendriks, H.; Döhler, H. “Managing ammonia emissions from livestock production in Europe”. *Environmental Pollution*, **2005**, *135*, 399–406. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.11.013>
- Welch, B.L. “The generalization of Student’s problem when several different population variances are involved”. *Biometrika*, **1947**, *34*, 28–35. <https://doi.org/10.1093/biomet/34.1-2.28>
- Wellock, I. J.; Emmans, G. C.; Kyriazakis, I. “Modelling the effects of thermal environment and dietary composition on pig performance: Model logic and concepts”. *Animal Science*, **2003**, *77*, 255-266. <https://doi.org/10.1017/S1357729800058999>
- Xie, Q.; Ni, J.Q.; Bao, J.; Su, Z. “A thermal environmental model for indoor air temperature prediction and energy consumption in pig building”. *Building and Environment*, **2019**, *161*, 106238. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106238>
- Ye, Z.; Zhang, G.; Li, B.; Strøm, J.S.; Dahl, P.J. “Ammonia emissions affected by airflow in a model pig house: Effects of ventilation rate, floor slat opening, and headspace height in a manure storage pit”. *Transactions of the ASAE*, **2008**, *51*, 2113–2122. doi: 10.13031/2013.25393
- Yeo, U.H.; Lee, I.B.; Kim, R.W.; Lee, S.Y.; Kim, J.G. “Computational fluid dynamics evaluation of pig house ventilation systems for improving the internal rearing environment”. *Biosystems Engineering*, **2019**, *186*, 259–278. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.08.007>
- Zhang, G.; Bjerg, B.; Strom, J.S.; Morsing, S.; Kai, P.; Tong, G.; Ravn, P. “Emission effects of three different ventilation control strategies A scale model study”. *Biosystems Engineering*, **2008**, *100*, 96–104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.012>
- Zhang, G.; Strøm, J.S.; Li, B.; Rom, H.B.; Morsing, S.; Dahl, P.; Wang, C. “Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings”. *Biosystems Engineering*, **2005**, *92*, 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.08.002>
- Zong, C.; Li, H.; Zhang, G. “Ammonia and greenhouse gas emissions from fattening pig house with two types of partial pit ventilation systems”. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, **2015**, *208*, 94–105. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.031>
- María D. Fernandez, Eugenio Losada, Juan A. Ortega, Tamara Arango, María José Ginzo-Villamayor, Roberto Besteiro, Santiago Lamosa, Martín Barrasa and Manuel R. Rodríguez. “Energy, Production and Environmental Characteristics of a Conventional Weaned Piglet Farm in North West Spain”. *Agronomy*, **2020**. <https://doi.org/10.3390/agronomy10060902>
- Manuel R. Rodríguez, Eugenio Losada, Roberto Besteiro, Tamara Arango, Ramon Velo, Juan A. Ortega and María D. Fernandez,. “Evolution of NH₃ Concentrations in Weaner Buildings based on Setpoint Temperature”. *Agronomy*, **2020**, *V 174*, p 231-238. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010107>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Producción de carne de cerdo en la UE durante el año 2019.	2
Figura 2. Evolución del censo porcino de la UE.	3
Figura 3. Distribución del nº total de explotaciones de ganado porcino por comunidades autónomas en al año 2020.	4
Figura 4. Distribución del censo porcino en España por comunidades autónomas.	5
Figura 5. Exportaciones del sector porcino ciclo 2017-2019.	6
Figura 6. Planta y sección de la sala de transición y ubicación de los sensores.	13
Figura 7. Variables de producción para cada ciclo. AWB: peso medio al inicio del ciclo(kg), AWE: peso medio al final del ciclo (kg), D: duración (días), M: mortalidad (%), AWG: peso medio diario (kg día ⁻¹).	23
Figura 8. Variables ambientales para cada ciclo. RH: humedad relativa media en la zona animal (%), RHout: humedad relativa media exterior (%), T: temperatura media en la zona animal(°C), Tout: temperatura media exterior (°C), CCO2: concentración media de CO2 en la zona animal (ppm.100-1), Q: caudal medio del aire extraído con ventilador (m3 s-1), v: velocidad media aire en la zona animal (m s-1).	24
Figura 9. Concentraciones medias de CO2 en la zona animal zone (CCO2) para cada ciclo analizado.	25
Figura 10. Requerimientos energéticos de las instalaciones de calefacción (Whs) y ventilación (Wvs) de cada ciclo en función de la temperatura exterior (Tout).	26
Figura 11. Requerimientos energéticos por ganancia de peso del lechón para las instalaciones de calefacción (Whs-kg) y ventilación (Wvs-kg) de para cada ciclo según la temperatura exterior (Tout).	27
Figura 12. Ajuste exponencial de la concentración de NH ₃ y la humedad relativa (HR) en la zona ocupada por animales.	30
Figura 13. Evolución diaria de la concentración media de NH ₃ en la zona ocupada por animales a las temperaturas de consigna analizadas.	31
Figura 14. Descomposición de series temporales aditivas.	32
Figura 15. Ajuste sinusoidal medido (Meas.) y modelizado utilizando el ajuste de mínimos cuadrados (LSS) y la transformada rápida de Fourier (FFT) para la evolución diaria de la concentración de NH ₃ a diferentes temperaturas de consigna.	32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fechas de inicio y finalización de cada uno de los ciclos de transición.	15
Tabla2. Retrocesos para cada componente, orden de retraso (p), grado de diferenciación (d) y ventana de promedio (q) de la variable prevista, temperatura de la zona animal (T_{az}); p y d de las variables predictoras temperatura del aire exterior (T_{ao}), área de la sección de salida del aire (S_{ao}), volumen de aire extraído (V_{ao}) y masa corporal animal (W_a).	18
Tabla 3. temperaturas de consigna para el control ambiental y períodos de medición	19

ANEXO I:

ARTÍCULOS PUBLICADOS

PUBLICACIONES:

ARTÍCULO 1

Artículo: *Energy, Production and Environmental Characteristics of a Conventional Weaned Piglet Farm in North West Spain*

Autores: Maria D. Fernandez, Eugenio Losada, Juan A. Ortega, Tamara Arango, María José Ginzo-Villamayor, Roberto Besteiro, Santiago Lamosa, Martín Barrasa y Manuel R. Rodriguez

Publicación: *Agronomy* (2020); 10(6), 902

ISSN: 2073-4395

DOI: [10.3390/agronomy10060902](https://doi.org/10.3390/agronomy10060902)

Factor de Impacto: 3.417 (2020)

Posición en la categoría: 16/91 (*Agronomy*)

Cuartil en la categoría: Q1

Contribución del autor de la tesis: Revisión bibliográfica; metodología; tratamiento de datos; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

Número de citas (Web of science): 5 (2022/11/15)

ARTÍCULO 2

Artículo: *Validation of an Autoregressive Integrated Moving Average Model for the Prediction of Animal Zone Temperature in a Weaned Piglet Building*

Autores: Juan A. Ortega, Eugenio Losada, Roberto Besteiro, Tamara Arango, Maria J. Ginzo-Villamayor, Ramon Velo, Maria D. Fernandez, Manuel R. Rodriguez



Publicación: *Biosystems Engineering*, 174 (2018); 231-238

ISSN: 1537-5110

DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012)

Factor de impacto: 2.983 (2018)

Posición en la categoría: 7/58 (Agriculture, Multidisciplinary)

Cuartil en la categoría: Q1

Número de citas (Web of science): 7 (2022/11/15)

Contribución del autor de la tesis: Metodología: tratamiento de datos para la mejora del modelo con inclusión de nuevas variables y validación del mismo; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

ARTÍCULO 3

Artículo: *Evolution of NH3 concentrations in weaner pig buildings based on setpoint temperature*

Autores: Manuel R. Rodriguez, Eugenio Losada, Roberto Besteiro, Tamara Arango, Ramon Velo, Juan A. Ortega and Maria D. Fernandez

Publicación: *Agronomy* (2020); 10(1), 107

ISSN: 2073-4395

DOI: [10.3390/agronomy10010107](https://doi.org/10.3390/agronomy10010107)

Factor de Impacto: 3.417 (2020)

Posición en la categoría: 16/91 (*Agronomy*)

Cuartil en la categoría: Q1

Número de citas (Web of science): 9 (2022/11/15)



Contribución del autor de la tesis: Revisión bibliográfica; metodología: tratamiento de datos y modelización; redacción y preparación inicial del documento y revisión del artículo.

ARTÍCULO:

**ENERGY, PRODUCTION AND ENVIRONMENTAL
CHARACTERISTICS OF A CONVENTIONAL
WEANED PIGLET FARM IN NORTH WEST SPAIN**

URL

REVISTA: <https://www.mdpi.com/journal/agronomy>

ARTÍCULO: <https://doi.org/10.3390/agronomy10060902>

ARTÍCULO:

**VALIDATION OF AN AUTOREGRESSIVE
INTEGRATED MOVING AVERAGE MODEL FOR
THE PREDICTION OF ANIMAL ZONE
TEMPERATURE IN A WEANED PIGLET BUILDING**

URL

REVISTA: <https://www.sciencedirect.com/>

ARTÍCULO: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.07.012>

ARTÍCULO:

**EVOLUTION OF NH₃ CONCENTRATIONS IN
WEANER BUILDINGS BASED ON SETPOINT
TEMPERATURE**

URL

REVISTA: <https://www.mdpi.com/journal/agronomy>

ARTÍCULO: <https://doi.org/10.3390/agronomy10010107>



Análisis de las condiciones ambientales, energéticas y productivas en una nave de transición de una explotación de porcino, validando el modelo predictivo ARIMA y empleando los datos obtenidos como estudio de mejora del bienestar animal. El estudio se realizó intentando minimizar los costes en cuanto a elementos a instalar para la medición de variables, así como la simplicidad del sistema a implantar.

Se procedió a la recopilación y análisis de datos ambientales en una explotación de transición de porcino en Galicia, durante 7 ciclos productivos, con una duración media de 41,71 días. El análisis de estos datos constituyó la base para la redacción de la presente Tesis Doctoral, que redundó en una mejora en el bienestar animal, además de una mejora en la eficiencia energética y productiva.