

TESE DE DOUTORAMENTO

**CARACTERIZACIÓN E  
INTERACCIÓN DE VARIABLES  
AMBIENTALES EN EL INTERIOR DE  
ALOJAMIENTOS PORCINOS DE  
TRANSICIÓN EN EL NOROESTE  
PENINSULAR**

Tamara Arango López

ESCOLA DE DOUTORAMENTO CAMPUS TERRA

PROGRAMA DE DOUTORAMENTO EN ENXEÑARÍA PARA O DESENVOLVEMENTO RURAL E CIVIL

LUGO 2017



## DECLARACIÓN DO AUTOR DA TESE

### Caracterización e interacción de variables ambientais en el interior de alojamientos porcinos de transición en el noroeste peninsular

D./Dna. Tamara Arango López

Presento miña tese, seguindo o procedemento adecuado ao Regulamento, e declaro que:

- 1) A tese abarca os resultados da elaboración do meu traballo.
- 2) No seu caso, na tese se fai referencia as colaboracións que tivo este traballo.
- 3) A tese é a versión definitiva presentada para a súa defensa e coincide ca versión enviada en formato electrónico.
- 4) Confirmo que a tese non incorre en ningún tipo de plaxio de outros autores nin de traballos presentados por min para a obtención de outros títulos.

*En Lugo, ... de ..... de 2017*

Asdo. Tamara Arango López



## AUTORIZACIÓN DO DIRECTOR / TITOR DA TESE

Caracterización e interacción de variables ambientais en el interior de alojamientos  
porcinos de transición en el noroeste peninsular

Dna. María Dolores Fernández Rodríguez

D. Manuel Ramiro Rodríguez Rodríguez

INFORMAN:

*Que a presente tese, correspóndese co traballo realizado por Dna. **Tamara Arango López**, baixo a miña dirección, e autorizo a súa presentación, considerando que reúne os requisitos esixidos no Regulamento de Estudos de Doutoramento da USC, e que como director desta non incorre nas causas de abstención establecidas na Lei 40/2015.*

*En Lugo, ... de ..... de 2017*

Asdo. María Dolores Fernández Rodríguez

Asdo. Manuel Ramiro Rodríguez Rodríguez



## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por la Xunta de Galicia y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del proyecto de investigación *Estrategias de control y automatización para la eficiencia energética y productiva en explotaciones porcinas de destete*, perteneciente a los programas sectoriales de investigación aplicada, PEME I+D Suma del Plan Gallego de Investigación, Desarrollo e Innovación Tecnológica, en el marco del programa operativo FEDER Galicia 2007-2013.





## AGRADECIMIENTOS

*Detrás dunha tese sempre hai máis persoas ademáis do autor, e durante estos cinco anos son moitas as que me acompañaron. En primeiro lugar quero agradecer ós meus directores o Dr. Manuel Ramiro Rodríguez e a Dra. María Dolores Fernández a labor de guiarme e axudarme neste largo traxecto. Querido Ro-Ro gracias pola tua paciencia e xenerosidade, querida Dolores grazas por estar sempre o outro lado, ca porta aberta, sempre que o necesitei.*

*Moitos fostes os que pasastes polo laboratorio neste tempo Carmen, Ismael... gracias por facer o día a día máis doado, e en especial ó Dr. Juan Ortega, grazas por axudarme en todo o que necesitei desde o día que aterrixei neste laboratorio.*

*Gracias o persoal de exporgondo, que de maneira desinteresada, nos abriron as portas da súa granxa, sen a vosa colaboración todo isto non sería posible.*

*Quero agradecer ó Departamento de Enxeñaría agroforestal o apoio institucional recibido, en especial ó Dr. Ramón Velo e Sara, despois de marcharte aínda me resolviches as numerosas dúbidas que me xurdiron. Gracias tamén o Dr. Jose Manuel Pereira polos seus consellos e ideas. Dr. Constantino Arce, grazas pola orientación e axuda prestada ante os problemas relacionados ca estadística.*

*Of course, I cannot forget my dear mates of Wageningen UR, dr.in. Nico Ogink, dr.ir Baastian Meerburg thanks for give me the opportunity to work in one of the most important research centre of the world. Special thanks to dr. Julio Mosquera and ir. Hendrik Jan Van Dooren, I could learn a lot from your work, thanks for consider me as one of your team, thank you for worrying about me and your help when I needed, you were, and you will be more than mates, friends. Thanks dear Daan Westrik, without your help it would be imposible to do my research stay at Wageningen UR.*

*Pero unha tesis doctoral e tamén froito do recoñecemento e do apoio vital que nos ofrecen as persoas que nos queren, sen o cal non teríamos a forza e enerxía que nos anima a seguir. Grazas os meus amigos de sempre, Canicoba e Pablo por estar sempre ahí, e sacarme un sorriso cando máis o necesitei, sobre todo as mañás. Tamén hai sitio para os amigos máis recentes, querido Xan López, grazas por solucionar os problemas informáticos, polas correccións do Galego durante o café, e polas tuas sabias palabras. Román Torres, gracias polos teus ánimos e por escoitarme tanto nestes últimos tempos, e por suposto pola tua retranca sempre a punto. Roberto Besteiro, o teu lugar nos agradecementos non vai no dos compañeiros de laboratorio, pois en pouco tempo ganácheste un lugar “nos amigos”, moitas grazas pola tua axuda*



*no traballo, pola tua paciencia, e porque sempre tes unhas palabras para reconfortar a calquera, grazas por facerme máis levadeiro este último ano. Gracias Humberto, por ayuda con el inglés. Gracias Leticia Rodríguez por tu cariño, madurez y sentido del humor cuando lo necesito.*

*Gracias a toda mi familia, a los que ya no están, y a los que están siempre, María y Paula Arango, gracias por escucharme y comprenderme. Paula gracias por creer en mi.*

*Y en último lugar, pero por encima de todas las cosas, gracias a mis padres, a los cuales debo todo lo que soy, gracias por vuestro apoyo incondicional, por vuestro amor y fuerza y por vuestra paciencia estos últimos tiempos, no ha sido fácil. Gracias a mi hermana Rebeca por su amor, su lealtad, por cuidarme y porque a tu lado crecí feliz. Papa, Mamá, Rebe habéis hecho tantos viajes a la USC como yo. Grazas Angel, porque “contigo comezou todo” gracias por acompañarme nesta etapa, por estar nas subidas e nas baixadas, ti mellor que ninguén sabes como vai esto, grazas por que a ti tamén che debo o que son hoxe, grazas por ser o meu empuxón e a miña inspiración.*

*A todos y todas mis más sinceros agradecimientos.*

*La autora.*



## RESUMEN

En un contexto económico cada vez más competitivo, y con una estricta normativa, el sector porcino, debe de hacer frente al desafío de encontrar sistemas más eficientes que minimicen el impacto que la actividad genera, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero y teniendo en cuenta el bienestar animal. El ambiente en el interior de estos alojamientos es un elemento que requiere especial atención ya que puede influir sobre múltiples aspectos como la salud y bienestar animal, y por tanto en la producción. Aunque la temperatura ambiente es el componente predominante del ambiente climático de los alojamientos porcinos de transición, las concentraciones de gases, como el amoníaco y el dióxido de carbono o la humedad relativa, influyen en la calidad del aire, en el bienestar animal y, por tanto, en la producción. Sin embargo, el control de las instalaciones de climatización va a estar basado, fundamentalmente, en una única sonda de temperatura.

La medición de variables como la HR, el CO<sub>2</sub>, la actividad y el NH<sub>3</sub> permitiría la caracterización del ambiente climático dentro del interior de las granjas y podría ser implementado como parte de sistemas de control más eficientes. Sin embargo la medición de estas variables resulta difícil. Por un lado, requiere un importante esfuerzo económico, ya que son necesarias la incorporación de nuevos sensores y la mejora de los controladores. Por otro, la falta de homogeneidad del ambiente interior dificulta la elección del emplazamiento adecuado para los sensores y así obtener mediciones significativas del conjunto del local y del estado del animal. En el caso de la concentración de NH<sub>3</sub>, la medición resulta más compleja, ya que la exposición prolongada a elevadas concentraciones de NH<sub>3</sub> en ambientes pulverulentos produce la saturación del sensor y para una adecuada medición se hace necesaria la instalación de equipos de filtrado de polvo, que suponen un alto coste económico.

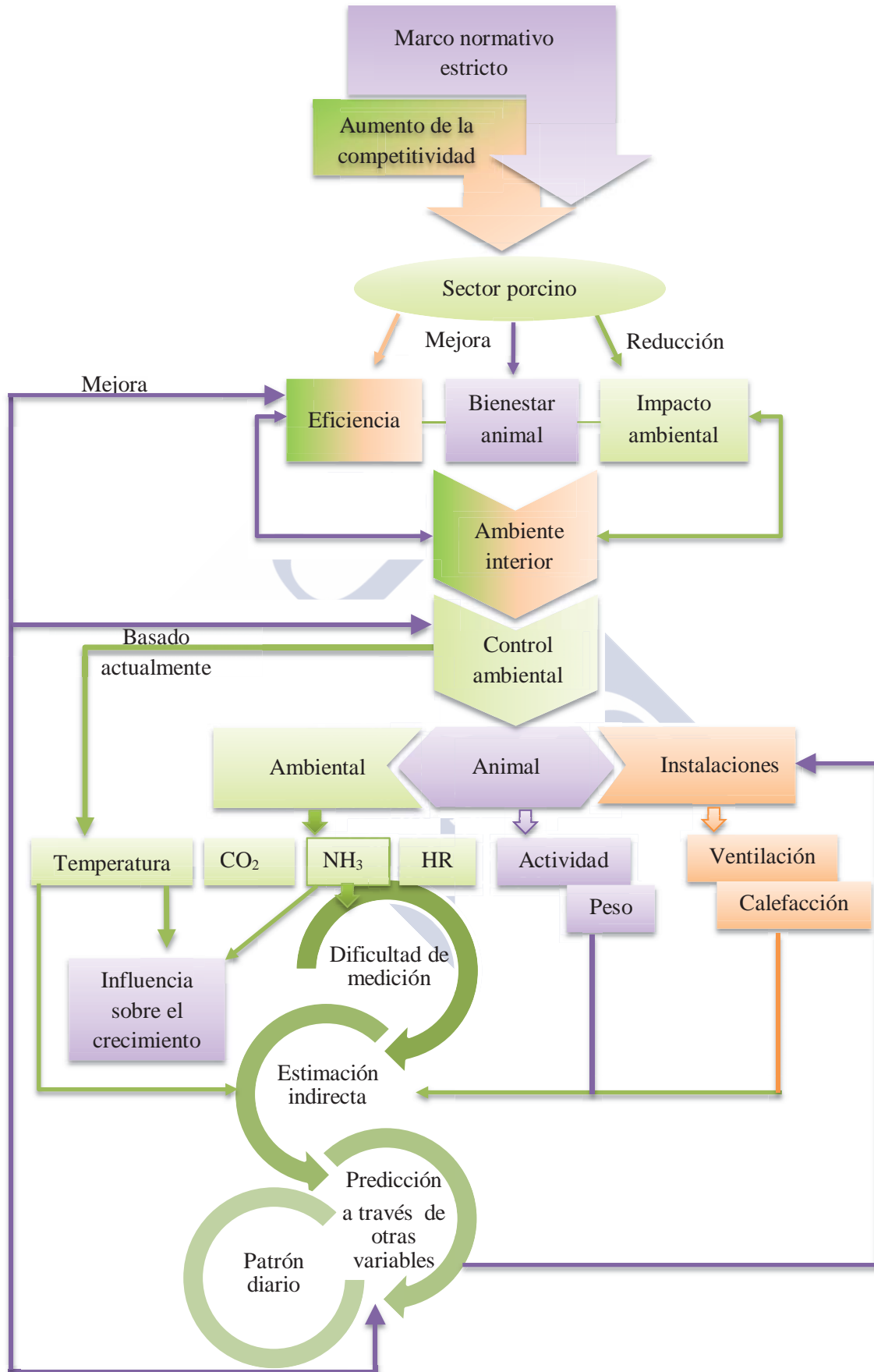
Desde este marco de referencia este trabajo persigue (1) conocer el ambiente en el interior de los alojamientos en una explotación porcina de cría de lechones, (2) estudiar la temperatura, las concentraciones de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, la humedad relativa, la velocidad del aire y la actividad animal en el interior del alojamiento y (3) obtener las interacciones entre las variables ambientales, con especial atención a la concentración de NH<sub>3</sub> y su estimación a partir de otras variables de medición más fácil, que permitan el establecimiento posterior de nuevas estrategias de control ambiental que permitan conseguir el máximo rendimiento con el mínimo consumo de recursos.

Para ello se realizó la medición en continuo de variables ambientales, animales y relativas al funcionamiento de las instalaciones, en una explotación de cría de lechones de 6 a 20 kg de p.v. situada en Galicia, durante distintos ciclos de producción.

Los resultados mostraron que el control basado en la temperatura afecta indirectamente a las concentraciones de gases; el incremento de la tasa de ventilación durante los periodos cálidos produce descensos en las concentraciones  $\text{CO}_2$  y HR, por el contrario la limitación de la ventilación durante las estaciones frías da lugar a mayores concentraciones de  $\text{CO}_2$  y de HR. La temperatura del alojamiento sufre variaciones fundamentalmente longitudinales. Además a medida que se incrementa la temperatura exterior aumentan los requerimientos energéticos en ventilación y disminuyen en calefacción. La HR se muestra como la más importante en la eficiencia energética y su inclusión podría mejorar de forma importante la eficiencia de la climatización, que en la explotación fue del 17% de la energía en los sistemas de climatización durante el ciclo, que se tradujo en un ahorro entre el 33 y el 47% de la energía aplicada por kg de lechón producido.

Un análisis de la concentración de los gases amoníaco y  $\text{CO}_2$ , de la humedad relativa, la actividad animal y velocidades de aire en la zona animal y a la salida del ventilador, obtuvo mayores correlaciones a temperatura consigna de 26°C, que a 25°C. De ello se desprende la importante incidencia de la temperatura de consigna en la dinámica de flujos de masa y energía que se produce en el alojamiento y su efecto sobre el resto de variables. Las variables que presentan un máximo y un mínimo bien definido en su evolución diaria, tienen buena correlación con la concentración de amoníaco, que además correlaciona positivamente con la de  $\text{CO}_2$  ( $R= 0,91$  y  $0,55$ ) y con la HR ( $R= 0,78$  y  $0,18$ ) para 26 y 25°C respectivamente. El modelo de regresión lineal más adecuado emplea la concentración de  $\text{CO}_2$  y la temperatura en el pasillo exterior. Éste proporciona buenos ajustes en ambas temperaturas de consigna, además de estar basado en variables de fácil medición.

La concentración de amoníaco en la zona animal es simétrica con respecto a la variación diaria de la temperatura exterior y sigue un patrón senoidal con valores de  $R^2$  entre 0,93 y 0,88 para 26 y 25°C respectivamente y sesgos prácticamente nulos. Este patrón senoidal no es fiable para la estimación en tiempo real de la concentración de  $\text{CO}_2$ . En contraposición, la onda senoidal diaria para la humedad relativa en la zona animal proporciona un buen ajuste para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C, con valores de  $R^2$  entre 0,81 y 0,83 y un error medio prácticamente nulo.



## ABSTRACT

In an increasingly competitive economic environment, and with strict regulations, the pig sector must face the challenge of finding more efficient systems that minimize the impact of the activity, reducing the emission of greenhouse gases and taking into account animal welfare. The environment inside these accommodations is an element that requires special attention as it can influence multiple aspects such as animal health and welfare, and therefore production. Although ambient temperature is the predominant component of the climatic environment of transitional swine accommodation, concentrations of gases, such as ammonia and carbon dioxide or relative humidity, influence air quality, animal welfare and, for both in production. However, the control of the air conditioning installations will be based, fundamentally, on a single temperature probe.

Measurement of variables such as RH, CO<sub>2</sub>, activity and NH<sub>3</sub> would allow the characterization of the climatic environment within the interior of the farms and could be implemented as part of more efficient control systems. However, the measurement of these variables is difficult. On the one hand, it requires an important economic effort, since the incorporation of new sensors and the improvement of the controllers are necessary. On the other hand, the lack of homogeneity of the indoor environment makes it difficult to choose the appropriate location for the sensors and thus obtain significant measurements of the whole of the premises and the state of the animal. In the case of the NH<sub>3</sub> concentration, the measurement is more complex, since prolonged exposure to high concentrations of NH<sub>3</sub> in dusty environments causes saturation of the sensor and for an adequate measurement it is necessary to install dust filtering equipment, which involves a high economic cost.

From this frame of reference, this PhD dissertation aims to (1) know the environment inside the lodges in a pig farm, (2) to study the temperature, NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations, relative humidity, air and animal activity within the housing, and (3) to obtain interactions between environmental variables, with special attention to the NH<sub>3</sub> concentration and its estimation from other easier measurement variables, allowing the subsequent establishment of new environmental control strategies that allows to achieve the maximum yield with the minimum consumption of resources.

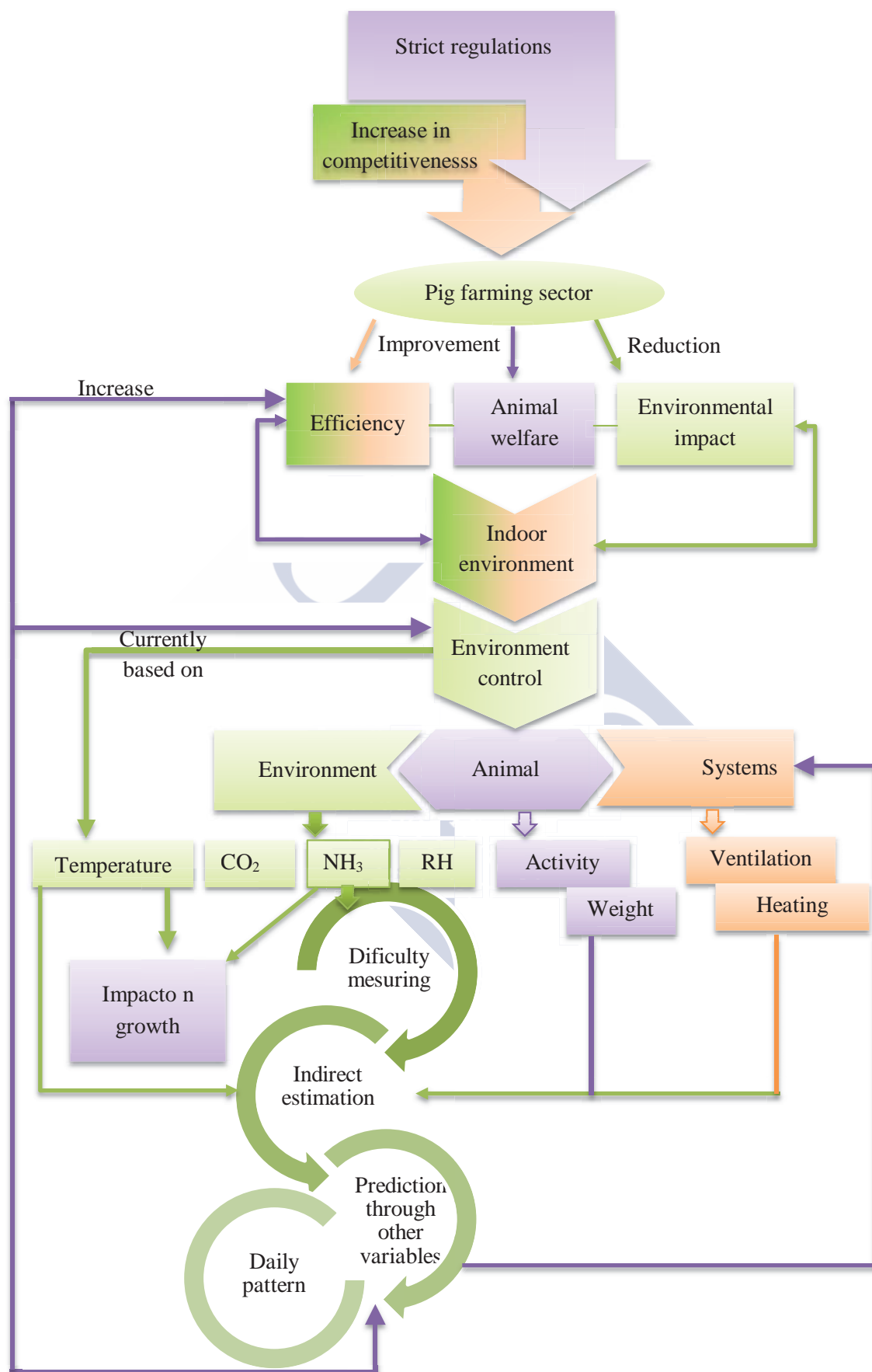
For this purpose, a continuous measurement of environmental, animal and variables related to the operation of ventilation and heating systems was carried out in a post-

weaning piglets of 6 to 20 kg live weight located in Galicia, during different production cycles.

The results showed that temperature-based control indirectly affects gas concentrations; the increase in ventilation rates during warm periods produces decreases in CO<sub>2</sub> and RH concentrations, whereas the limitation of ventilation during cold seasons results in higher concentrations of CO<sub>2</sub> and RH. The temperature of the housing undergoes essentially longitudinal variations. In addition, as the outside temperature increases, the energy requirements in ventilation increase and decrease the heating. The RH is shown to be the most important in energy efficiency and its inclusion could significantly improve the efficiency of air conditioning, which in operation was 17% of the energy in the ventilation systems during the cycle, which resulted in a saving between 33 and 47% of the energy applied per kg of piglet produced.

An analysis of the concentration of ammonia and CO<sub>2</sub> gases, relative humidity, animal activity and air velocities in the animal zone and at the fan outlet, obtained higher correlations at a setpoint temperature of 26°C than at 25°C. This results in the significant incidence of setpoint temperature in the dynamics of mass and energy fluxes that occurs in the housing and its effect on the rest of variables. The variables that present a maximum and a well defined minimum in their daily evolution, have a good correlation with the concentration of ammonia, which also correlates positively with that of CO<sub>2</sub> ( $R = 0,91$  and  $0,55$ ) and with HR ( $R = 0,78$  and  $0,18$ ) for 26 and 25°C respectively. The most appropriate linear regression model employs CO<sub>2</sub> concentration and temperature in the outer aisle. This provides good settings at both setpoint temperatures, as well as being based on easily measured variables.

The concentration of ammonia in the animal zone is symmetrical with respect to the daily variation of the external temperature and follows a sinusoidal pattern with values of  $R_2$  between 0,93 and 0,88 for 26 and 25°C respectively and almost zero bias. This sinusoidal pattern is not reliable for real-time estimation of CO<sub>2</sub> concentration. In contrast, the daily sine wave for relative humidity in the animal zone provides a good fit for the setpoint temperatures of 26 and 25°C, with  $R^2$  values between 0,81 and 0,83 and a practically zero mean error.



# Índices y simbología

---





## Índice de contenido

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>3</b>
2.1 EVOLUCIÓN Y SITUACIÓN DEL SECTOR PORCINO ESPAÑOL .....	6
2.2 VARIABLES AMBIENTALES .....	9
2.2.1 <i>Temperatura</i> .....	9
2.2.2 <i>Humedad Relativa</i> .....	11
2.2.3 <i>Dióxido de Carbono</i> .....	12
2.2.4 <i>Amoníaco</i> .....	15
2.2.4.1 Concentraciones de NH <sub>3</sub> recomendadas y obtenidas por otros autores .....	18
2.2.4.2 Factores que influyen en la concentración y emisión de NH <sub>3</sub> .....	20
2.2.5 <i>Actividad Animal</i> .....	25
2.2.6 <i>Control de las instalaciones</i> .....	26
<b>CAPÍTULO 3. OBJETIVOS .....</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 4. MATERIAL Y MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 ENSAYO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>35</b>
4.1.1 <i>Emplazamiento</i> .....	35
4.1.2 <i>La explotación porcina</i> .....	36
4.1.3 <i>El proceso productivo</i> .....	41
<i>Zona de lechoneras</i> .....	45
4.1.3.1 <i>Flujo de animales en la explotación</i> .....	46
<b>4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>46</b>
4.2.1 <i>Descripción del alojamiento</i> .....	46
4.2.2 <i>VARIABLES medidas en la sala</i> .....	47
4.2.2.1 Variables ambientales .....	50
4.2.2.2 Variables de carácter animal .....	53
4.2.2.3 Variables relativas al funcionamiento de las instalaciones de ventilación y calefacción ...	55
<b>4.3 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS .....</b>	<b>62</b>
4.3.1 <i>Caracterización ambiental de la sala</i> .....	62
4.3.1.1 Período de estudio.....	62
4.3.1.2 Pruebas de normalidad .....	63
4.3.1.3 Diferencia entre medias .....	65
4.3.2 <i>Estimación de la C<sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub> a través de la relación con otras variables</i> .....	70
4.3.2.1 Período de estudio.....	70
4.3.2.2 Pruebas de normalidad .....	70
4.3.2.3 Prueba T para dos muestras independientes.....	71
4.3.2.4 Análisis de correlación.....	72
4.3.2.5 Análisis de regresión.....	73

4.3.3	<b><i>Evolución de la concentración de las variables, <math>C_{NH_3-ZA}</math>, <math>C_{CO_2-ZA}</math> y <math>HR_{ZA}</math></i></b> .....	75
4.3.3.1	Análisis matemático.....	75
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>77</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA DE LA SALA.....	77
5.1.1	<i>Caracterización ambiental de la sala</i> .....	79
5.1.1.1	Comprobación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad para las variables temperatura concentración de $NH_3$ y $CO_2$ en zona animal en datos diezminutales .....	79
5.1.1.2	Evolución, distribución y estimación indirecta de la temperatura en el interior del alojamiento .....	86
5.1.1.2.1	Evolución de la temperatura durante los 7 ciclos estudiados .....	86
5.1.1.3	Distribución de la temperatura en el alojamiento.....	94
5.1.1.4	Estimación de la temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) en base a mediciones indirectas.....	96
5.1.1.5	Evolución de la humedad relativa durante los 7 ciclos estudiados.....	103
5.1.1.6	Evolución de la concentración de $CO_2$ durante los 7 ciclos estudiados .....	108
5.1.1.7	Caracterización energética de los sistemas de climatización y productiva.....	115
5.2	PREDICCIÓN LINEAL DE LA $C_{NH_3-ZA}$ A PARTIR DE OTRAS VARIABLES.....	119
5.2.1	<i>Estudio de la normalidad en la variable <math>C_{NH_3-ZA}</math></i> .....	119
5.2.1.1	Prueba de normalidad .....	119
5.2.1.1.1	Prueba de normalidad para la variable $C_{NH_3-ZA}$ y transformación de Box-Cox .....	120
5.2.1.2	Prueba T para la diferencia de medias de $C_{NH_3-ZA}$ a $T_C$ 26 y 25°C.....	122
5.2.2	<i>Estadísticos descriptivos de las variables estudiadas para <math>T_C</math> de 26 y 25°C</i> .....	124
5.2.3	<i>Correlación entre las variables estudiadas para <math>T_C</math> de 26 y 25°C</i> .....	130
5.2.4	<i>Modelos de regresión lineal de <math>C_{NH_3-ZA}</math> para <math>T_C</math> de 26 y 25°C</i> .....	136
5.2.5	<i>Modelos de regresión lineal de la <math>C_{NH_3-ZA}</math> a partir de datos medios de otras variables para <math>T_C</math> de 26 y 25°C</i> .....	143
5.3	EVOLUCIÓN DIARIA DE LAS CONCENTRACIONES DE $NH_3$ , $CO_2$ Y $HR$ EN ZONA ANIMAL....	147
5.3.1	<i>Evolución diaria de la concentración de amoníaco en la zona animal</i> .....	147
5.3.2	<i>Evolución diaria de la concentración de <math>CO_2</math> en la zona animal</i> .....	152
5.3.3	<i>evolución diaria de la concentración de humedad relativa en la zona animal</i> .....	155
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....</b>		<b>161</b>
<b>CAPÍTULO 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>169</b>
<b>APÉNDICE.....</b>		<b>I</b>
	CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA DE LA SALA .....	I

## Índice de tablas

TABLA 1. VALORES MEDIOS DE NH <sub>3</sub> OBTENIDOS POR OTROS AUTORES PARA GRANJAS CONVENCIONALES DE CERDOS DE ENGORDE CON VENTILACIÓN MECÁNICA Y SUELO EMPARILLADO.....	19
TABLA 2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ), Y EN LA SALIDA DEL AIRE ( $C_{CO_2-S}$ ), TEMPERATURA EN PASILLO EXTERIOR ( $T_{PEX}$ ), EN LA ENTRADA DEL AIRE ( $T_E$ ), EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) Y EN LA SALIDA DEL AIRE ( $T_S$ ), Y HUMEDAD RELATIVA EN LA ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y EN LA SALIDA DEL AIRE ( $HR_S$ ), VELOCIDAD DEL AIRE EN LA ZONA ANIMAL ( $VIN_{ZA}$ ) Y CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ).....	53
TABLA 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES ANIMALES.....	55
TABLA 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES DE LAS INSTALACIONES.....	60
TABLA 5. FECHA DE INICIO Y FIN DE CADA UNO DE LOS CICLOS.....	62
TABLA 6. FECHA DE INICIO Y FIN PARA CADA PERIODO PARA CADA UNO DE LOS CICLOS.....	63
TABLA 7. CLASIFICACIÓN DE FAMILIAS DE DISTRIBUCIONES DE JOHNSON.....	65
TABLA 8. DATOS ANALIZADOS.....	70
TABLA 9. PRUEBAS DE NORMALIDAD: ESTADÍSTICO (EST.) GRADOS DE LIBERTAD (GL), NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LAS VARIABLES TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ), HUMEDAD EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) PARA TODOS LOS CICLOS.....	80
TABLA 10. TRANSFORMACIONES DE JOHNSON DE TIPO SISTEMA SIN LÍMITES ( $S_U$ ) Y SISTEMA ACOTADO ( $S_B$ ) PARA LAS VARIABLES TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ), HUMEDAD EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) PARA TODOS LOS CICLOS.....	81
TABLA 11. PRUEBAS DE NORMALIDAD: ESTADÍSTICO (EST.), GRADOS DE LIBERTAD (GL) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA VARIABLES TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ), HUMEDAD EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) TRANSFORMADAS.....	82
TABLA 12. PRUEBA DE HOMOGENEIDAD DE VARIANZAS: ESTADÍSTICO DE LEVENE ( $W_1$ ) GRADOS DE LIBERTAD DE LA DISTRIBUCIÓN (GL1 Y GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LAS VARIABLES TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ), HUMEDAD EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) PARA TODOS LOS CICLOS.....	86
TABLA 13. VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.), MÍNIMO (MÍN.) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) PARA LA TEMPERATURA EXTERIOR ( $T_{EXT}$ ), LA TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) OBTENIDAS Y TEMPERATURA MEDIA DE CONSIGNA ( $T_C$ ) ESTABLECIDA PARA CADA CICLO Y PERÍODO.....	88
TABLA 14. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICOS DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS	

CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA VARIABLE TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	89
TABLA 15. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA LA TEMPERATURA EN LA ZONA NIMAL ( $T_{ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	90
TABLA 16. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) EN PERÍODO CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO. ....	92
TABLA 17. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA LA TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) EN PERÍODO CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO. ....	93
TABLA 18. DISTRIBUCION EN ALTURA DE LA TEMPERATURA A 0 METROS ( $T_{A10}$ ), A 1 METRO ( $T_{A7}$ ) Y A 2 METROS ( $T_{A13}$ ) POR CICLO. ....	95
TABLA 19. ERROR MEDIO (EM), DESVIACIÓN TÍPICA DEL ERROR (SDERROR), RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RECM), ERROR MEDIO ABSOLUTO PORCENTUAL (EMAP) Y COEFICIENTE DE CORRELACIÓN ( $R^2$ ) DE LA VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN PARA LAS TEMPERATURAS COMPRENDIDAS ENTRE 23 Y 28°C. ....	102
TABLA 20. EVOLUCIÓN DEL VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.) Y MÍNIMO (MÍN.) DE LA HUMEDAD RELATIVA EXTERIOR ( $HR_{EXT}$ ), HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y DE LA HUMEDAD EN LA SALIDA EXTERIOR DEL AIRE ( $HR_S$ ), PORCENTAJE DEL TIEMPO EN EL QUE LA HUMEDAD EN LA ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) NO EXCEDE LOS VALORES RECOMENDADOS, 50-75%, (FORCADA ET AL., 2009) EN CADA CICLO (% V.C), PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE LA HUMEDAD EN LA ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) EXCEDE EL 80% (%T>80%) Y PORCENTAJE DE TIEMPO EN EL QUE LA HUMEDAD EN LA ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) ES INFERIOR AL 40% (%T<40%). ....	104
TABLA 21. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	105
TABLA 22. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	105
TABLA 23. EVOLUCIÓN DEL VALOR MEDIO DE LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y DE LA HUMEDAD EN LA SALIDA EXTERIOR DEL AIRE ( $HR_S$ ) PARA LOS PERÍODOS CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL. ....	106
TABLA 24. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) EN PERÍODO CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO COMPARADO. ....	107

TABLA 25. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA LA HR EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) EN PERÍODO CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO COMPARADO. ....	108
TABLA 26. EVOLUCIÓN DEL VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.) Y MÍNIMO (MÍN.) DE CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) Y $CO_2$ EN LA SALIDA DEL AIRE ( $C_{CO_2-S}$ ), Y PORCENTAJE DE TIEMPO (% $T$ ) DURANTE EL CUAL LOS VALORES RECOMENDADOS SON SUPERADOS EN CADA CICLO SEGÚN CIRG (1999) Y LEE <i>ET AL.</i> (2005). ....	109
TABLA 27. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	110
TABLA 28. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) ENTRE LOS CICLOS COMPARADOS. ....	111
TABLA 29. EVOLUCIÓN DEL VALOR MEDIO DE CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) Y EN LA SALIDA DEL AIRE ( $C_{CO_2-S}$ ) PARA LOS PERÍODOS CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL DE CADA CICLO. ....	113
TABLA 30. PRUEBAS ROBUSTAS DE IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE WELCH ( $T_1$ ) Y BROWN-FORSYTHE ( $W_2$ ), GRADOS DE LIBERTAD INTER-GRUPOS (GL1), GRADOS DE LIBERTAD INTRA-GRUPOS CORREGIDOS (GL2) Y NIVEL CRÍTICO (SIG.) PARA LA CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) ENTRE LOS PERIODOS CRÍTICO, POSTCRÍTICO Y FINAL. ....	114
TABLA 31. PRUEBA DE GAMES-HOWELL: ESTADÍSTICO DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_2$ ), ERROR ESTÁNDAR (SE) NIVEL CRÍTICO (SIG.) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y LÍMITE SUPERIOR (L.S) PARA LA CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) EN PERÍODO CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO. .	115
TABLA 32. PRUEBA DE NORMALIDAD PARA LA CONCENTRACIÓN DE $NH_3$ ( $C_{NH_3-ZA}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA ( $T_C$ ) DE 26 Y 25°C. ....	120
TABLA 33. VALORES DE $\Delta BC$ OBTENIDOS A PARTIR DE LA TRANSFORMACIÓN DE BOX-COX PARA LAS DISTRIBUCIONES DE LA $C_{NH_3-ZA}$ PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA ( $T_C$ ) DE 26 Y 25°C. ....	121
TABLA 34. PRUEBAS DE NORMALIDAD PARA LA VARIABLE TRANSFORMADA DE CONCENTRACIÓN DE $NH_3$ ( $C_{NH_3-ZA}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA ( $T_C$ ) DE 26 Y 25°C. ....	121
TABLA 35. ESTADÍSTICOS PARA CONCENTRACIÓN DE $NH_3$ ( $C_{NH_3-ZA}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA ( $T_C$ ) DE 26 Y 25°C. ....	122
TABLA 36 . PRUEBA T PARA LA IGUALDAD DE MEDIAS: ESTADÍSTICO DE LEVENE ( $W_1$ ), NIVEL CRÍTICO DE LA PRUEBA $W_1$ (SIG.F), ESTADÍSTICO PARA DIFERENCIA DE MEDIAS ( $T_3$ ), GRADOS DE LIBERTAD (GL), NIVEL CRÍTICO DE LA PRUEBA T (SIG. $T_3$ ), DIFERENCIA DE MEDIAS ( $\neq$ MED.), DIFERENCIA DE ERROR	

ESTÁNDAR ( $\neq$ SE) Y LÍMITE INFERIOR (L.I) Y SUPERIOR (L.S) DEL INTERVALO DE CONFIANZA PARA LA VARIABLE CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ) SEGÚN LAS TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26 Y 25°C.....	123
<p>TABLA 37. VALOR MÍNIMO (MÍN.), MÁXIMO (MÁX), MEDIO (MED.) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) DE LAS VARIABLES: CONCENTRACIONES DE NH<sub>3</sub> (<math>C_{NH_3-ZA}</math>) Y CO<sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL (<math>C_{CO_2-ZA}</math>), HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL (<math>HR_{ZA}</math>), VELOCIDAD INTERIOR (<math>VIN_{ZA}</math>) Y EXTERIOR (<math>V_{EX}</math>), TEMPERATURA DEL PASILLO EXTERIOR (<math>T_{PEX}</math>) Y EN ZONA ANIMAL (<math>T_{ZA}</math>), ACTIVIDAD ANIMAL LIGERA (<math>AA_L</math>) Y MODERADA (<math>AA_M</math>) A PARTIR DE DATOS HORARIOS PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA (<math>T_C</math>) DE 26°C Y 25°C. ....</p>	124
<p>TABLA 38. MATRIZ DE CORRELACIÓN A PARTIR DE DATOS HORARIOS DE LAS VARIABLES: CONCENTRACIONES DE NH<sub>3</sub> (<math>C_{NH_3-ZA}</math>) Y CO<sub>2</sub> (<math>C_{CO_2-ZA}</math>) EN ZONA ANIMAL, HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL (<math>HR_{ZA}</math>), VELOCIDAD INTERIOR (<math>VIN_{ZA}</math>) Y EXTERIOR (<math>V_{EX}</math>), TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR (<math>T_{PEX}</math>) Y EN ZONA ANIMAL (<math>T_{ZA}</math>) Y ACTIVIDAD ANIMAL LIGERA (<math>AA_L</math>) Y MODERADA (<math>AA_M</math>) PARA TEMPERATURAS DE CONSIGNA (<math>T_C</math>) DE 26°C Y 25°C.....</p>	130
<p>TABLA 39. ESTADÍSTICO (Z) PARA CONTRASTAR LA SIGNIFICACIÓN DE LA DIFERENCIA ENTRE LOS COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES PARA LOS DOS GRUPOS SEGÚN LA TEMPERATURA DE CONSIGNA.....</p>	136
<p>TABLA 40. COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS (B), COEFICIENTES ESTANDARIZADOS (B), CONSTANTE (CTE), COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (R), COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN AJUSTADO (<math>R^2</math>), ERROR ESTÁNDAR (SE), ESTADÍSTICOS DE COLINEALIDAD (T' Y VIF) Y ESTADÍSTICO DE DURBIN WATSON (DW) PARA LA ESTIMACIÓN DE LA <math>C_{NH_3-ZA}</math> A PARTIR DE REGRESIONES MÚLTIPLES CON LAS VARIABLES (V): <math>C_{CO_2-ZA}</math>, <math>HR_{ZA}</math>, <math>V_{EX}</math> Y <math>T_{PEX}</math>, PARA DATOS HORARIOS Y TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C.....</p>	137
<p>TABLA 41. COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS (B), COEFICIENTES ESTANDARIZADOS (B), CONSTANTE (CTE), COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (R), COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN AJUSTADO (<math>R^2</math>), ERROR ESTÁNDAR (SE), ESTADÍSTICOS DE COLINEALIDAD (T' Y VIF) Y ESTADÍSTICO DE DURBIN WATSON (D.W.) PARA LA ESTIMACIÓN DE LA <math>C_{NH_3-ZA}</math> A PARTIR DE REGRESIONES MÚLTIPLES CON LAS VARIABLES (V): <math>C_{CO_2-ZA}</math>, <math>HR_{ZA}</math>, <math>VIN_{ZA}</math>, <math>V_{EX}</math>, Y <math>HR_{ZA}</math> PARA DATOS HORARIOS Y TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C. ....</p>	141
<p>TABLA 42. COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS (B), COEFICIENTES ESTANDARIZADOS (B), CONSTANTE (CTE), COEFICIENTE DE CORRELACIÓN (R), COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN AJUSTADO (<math>R^2</math>), ERROR ESTÁNDAR (SE) ESTADÍSTICOS DE COLINEALIDAD (T' Y VIF) Y ESTADÍSTICO DE DURBIN WATSON (DW) PARA LA ESTIMACIÓN DE <math>C_{NH_3-ZA}</math> A PARTIR DE REGRESIÓN LINEAL CON LAS VARIABLES (V): <math>C_{CO_2-ZA}</math>, <math>HR_{ZA}</math>, <math>V_{EX}</math>, <math>T_{PEX}</math> Y <math>HR_{ZA}</math> PARA DATOS MEDIOS HORARIOS POR GRUPO DE TEMPERATURA DE CONSIGNA (<math>T_C = 26</math> Y <math>25^\circ\text{C}</math>).....</p>	144

TABLA 43. VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.), MÍNIMO (MÍN.) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) DE LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN LA ZONA ANIMAL, ( $C_{NH_3-ZA}$ ) SEGÚN TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	147
TABLA 44. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA CURVA SENOIDAL DE LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ): AMPLITUD (A), Y ÁNGULO DE FASE INICIAL ( $\Phi$ ) Y HORA DE INICIO DE LA ONDA (INICIO) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	149
TABLA 45. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN ( $R^2$ ), ERROR MEDIO (AE), DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ERROR (SDE), RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) Y ERROR MEDIO RELATIVO (RME) PARA EL AJUSTE DE LA EVOLUCIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ) A UNA CURVA SENOIDAL PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	151
TABLA 46. VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.), MÍNIMO (MÍN.) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) PARA LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	152
TABLA 47. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA CURVA SENOIDAL DE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA: AMPLITUD (A), ÁNGULO DE FASE INICIAL ( $\Phi$ ) Y HORA DE INICIO DE LA ONDA (INICIO) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA.	153
TABLA 48. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN ( $R^2$ ), ERROR MEDIO (AE), DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ERROR (SDE), RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) Y ERROR MEDIO RELATIVO (RME) PARA EL AJUSTE DE LA EVOLUCIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) A UNA CURVA SENOIDAL PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	154
TABLA 49. VALOR MEDIO (MED.), MÁXIMO (MÁX.), MÍNIMO (MÍN.) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) PARA LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	155
TABLA 50. VALORES CARACTERÍSTICOS DE LA CURVA SENOIDAL DE LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA: AMPLITUD (A) ÁNGULO DE FASE INICIAL ( $\Phi$ ) Y HORA DE INICIO DE LA ONDA (INICIO) PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	156
TABLA 51. COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN ( $R^2$ ), ERROR MEDIO (AE), DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL ERROR (SDE), RAÍZ DEL ERROR CUADRÁTICO MEDIO (RMSE) Y ERROR MEDIO RELATIVO (RME) PARA EL AJUSTE DE LA EVOLUCIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) A UNA CURVA SENOIDAL PARA CADA TEMPERATURA DE CONSIGNA ( $T_C$ ).	158



## Índice de figuras

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DEL NÚMERO TOTAL DE EXPLOTACIONES DE GANADO PORCINO POR COMUNIDADES AUTÓNOMAS A 01/03/2017. (FUENTE: MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2017).	7
FIGURA 2. PRODUCCIÓN DE CARNE DE CERDO EN LA UNIÓN EUROPEA DURANTE EL AÑO 2016 EN MILES DE TONELADAS. (FUENTE: MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE, 2017).	8
FIGURA 3. VISIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS PROCESOS Y FACTORES IMPLICADOS EN LA LIBERACIÓN DE AMONÍACO EN ALOJAMIENTOS GANADEROS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA A PARTIR DE KOERKAMP ET AL. (1998).	16
FIGURA 4. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA GRANJA.	35
FIGURA 5. LOCALIZACIÓN Y VISTA AÉREA DE LA EXPLOTACIÓN PORCINA.	35
FIGURA 6. PLANTA GENERAL DE LA EXPLOTACIÓN.	36
FIGURA 7. ESQUEMA DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA EXPLOTACIÓN.	42
FIGURA 8. DIAGRAMA DE FLUJO DE LOS ANIMALES EN LA EXPLOTACIÓN.	46
FIGURA 9. VISTA GENERAL DE LA SALA.	47
FIGURA 10. UBICACIÓN DE LOS SENSORES UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD EXTERIOR DEL AIRE ( $V_{EX}$ ) Y EN LA ZONA ANIMAL ( $V_{INZA}$ ), HUMEDAD RELATIVA EN LA SALIDA DEL AIRE ( $HR_S$ ) Y EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ), CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN SALIDA DEL AIRE ( $C_{CO_2-S}$ ) Y EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ), TEMPERATURA EN LA SALIDA DEL AIRE ( $T_S$ ), EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ), EN LA ENTRADA DEL AIRE ( $T_E$ ), EN PASILLO EXTERIOR ( $T_{PEX}$ ), EN LA ENTRADA DEL FLUIDO CALEFACTOR EN LA SALA ( $T_{PCE}$ ) Y EN LA SALIDA ( $T_{PCS}$ ), CONCENTRACIÓN DE $NH_3$ EN LA ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ), CAUDAL DEL FLUÍDO CALEFACTOR (CPC) Y DE LA ACTIVIDAD ANIMAL ( $AA_1$ , $AA_2$ , $AA_3$ Y $AA_4$ ).	49
FIGURA 11. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA EN EL CORRAL 1 ( $T_{A1}$ ), 2 ( $T_{A2}$ ), 3 ( $T_{A3}$ ), 4 ( $T_{A4}$ ), 5 ( $T_{A5}$ ) Y 6 ( $T_{A6}$ ), TEMPERATURA ENTRE CORRALES 3 Y 4 A UNA ALTURA DE 0 M ( $T_{A7}$ ), 1 M ( $T_{A10}$ ) Y 2 M, ( $T_{A13}$ ), TEMPERATURA EN PASILLO CENTRAL ( $T_{A8}$ ) Y TEMPERATURA EN CORRAL 7 ( $T_{A9}$ ).	50
FIGURA 12. (A) DETALLE DE LAS SONDAS DE MEDICIÓN DE: (A) VELOCIDAD DEL AIRE ( $V_{INZA}$ ), (B) CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ ( $C_{CO_2-ZA}$ ), (C) CONCENTRACIÓN DE $NH_3$ ( $C_{NH_3-ZA}$ ) Y (D) TEMPERATURA ( $T_{ZA}$ ) Y HUMEDAD RELATIVA ( $HR_{ZA}$ ).	51
FIGURA 13. (A) DETALLE DE LA SONDA HÍBRIDA DE MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD RELATIVA EN LA SALIDA DEL AIRE ( $T_S$ Y $HR_S$ RESPECTIVAMENTE) Y (B) SENSOR DE MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE $CO_2$ EN LA SALIDA DEL AIRE ( $C_{CO_2-S}$ ).	52
FIGURA 14. DETECTORES DE PRESENCIA PARA LA MEDICIÓN DE LA ACTIVIDAD LIGERA ( $AA_L$ ) Y ACTIVIDAD MODERADA ( $AA_M$ ).	54
FIGURA 15. BÁSCULA PARA EL PESAJE DE LOS ANIMALES.	55

FIGURA 16. INSTALACIÓN DEL ANEMÓMETRO PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EXTRAÍDO POR EL SISTEMA DE VENTILACIÓN.....	57
FIGURA 17. VISTA LATERAL DEL ANEMÓMETRO Y DE LA CAMPANA DE EXTRACCIÓN. ....	58
FIGURA 18. VISTA FRONTAL DEL ANEMÓMETRO Y DE LA CAMPANA DE EXTRACCIÓN. ....	58
FIGURA 19. CAUDALÍMETRO ULTRASÓNICO PARA MEDICIÓN DE CPC.....	58
FIGURA 20. CUADRO DE CONTROL I. ....	61
FIGURA 21. CUADRO DE CONTROL II.....	61
FIGURA 22. ESTACIÓN METEOROLÓGICA EXTERIOR.....	61
FIGURA 23. PESO MEDIO AL INICIO DEL CICLO, PESO MEDIO AL FINAL DEL CICLO, GANANCIA MEDIA DE PESO Y PORCENTAJE DE MORTALIDAD DE LOS ANIMALES Y DURACIÓN PARA CADA DURACIÓN PARA CADA CICLO ESTUDIADO.....	77
FIGURA 24. HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN ZONA ANIMAL, HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN EL EXTERIOR, TEMPERATURA MEDIA EN ZONA ANIMAL, TEMPERATURA MEDIA EXTERIOR, CAUDAL MEDIO DE AIRE EXTRAÍDO POR EL VENTILADOR Y VELOCIDAD DEL AIRE EN ZONA ANIMAL PARA CADA CICLO. ....	78
FIGURA 25. GRÁFICO Q-Q NORMAL PARA LA VARIABLE TEMPERATURA EN ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) PARA LOS CICLOS I, II, III, IV, V, VI Y VII.....	83
FIGURA 26. GRÁFICO Q-Q NORMAL PARA LA VARIABLE HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) PARA LOS CICLOS I, II Y VII. ....	84
FIGURA 27. GRÁFICO Q-Q NORMAL PARA LA VARIABLE $C_{CO_2}$ EN ZONA ANIMAL $C_{CO_2-ZA}$ .....	85
FIGURA 28. TEMPERATURAS MEDIAS EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) PARA CADA UNO DE LOS CICLOS. ....	91
FIGURA 29. TEMPERATURA MEDIA EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) PARA LOS PERÍODOS CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO. ....	94
FIGURA 30. DISTRIBUCIÓN TRANSVERSAL DE LA TEMPERATURA EN LA SALA PARA: I (-), II (-), III (-), IV (-), V (-) Y VI (-). ....	95
FIGURA 31. PERFIL DE TEMPERATURA EN LOS CICLOS: I (-), II (-), III (-), IV (-), V (-) Y VI (-). ....	96
FIGURA 32. RELACIÓN LINEAL ENTRE LAS TEMPERATURAS A 1 M DE ALTURA EN EL CORRAL 4 Y EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ). ....	97
FIGURA 33. RELACIÓN LINEAL ENTRE LA TEMPERATURA MEDIA DE LOS 6 CORRALES Y LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ).....	98
FIGURA 34. RELACIÓN LINEAL ENTRE LA TEMPERATURA MEDIA Y LA TEMPERATURA EN EL BOX 4 ( $T_{C4}$ )...99	99
FIGURA 35. VALORES DE LA PENDIENTE (-) Y DEL TÉRMINO INDEPENDIENTE (-) DE LAS RECTAS QUE RELACIONAN LAS TEMPERATURAS A 1 M DE ALTURA SOBRE CADA CORRAL CON SU TEMPERATURA MEDIA. ....	100
FIGURA 36. VALORES DE LA PENDIENTE DE LAS RECTAS CON TÉRMINO INDEPENDIENTE NULO QUE RELACIONAN LAS TEMPERATURAS A 1 M DE ALTURA SOBRE CADA CORRAL CON SU TEMPERATURA MEDIA. ....	101

FIGURA 37. TEMPERATURAS LONGITUDINALES MEDIDAS PARA LAS TEMPERATURAS MEDIAS DE 24 (+), 26 (+) Y 28°C (+) Y TEMPERATURAS LONGITUDINALES ESTIMADAS PARA LAS TEMPERATURAS MEDIAS DE 24 (-), 26 (-) Y 28°C (-) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA A LA ENTRADA DE AIRE.....	102
FIGURA 38. HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) PARA CADA UNO DE LOS CICLOS.....	106
FIGURA 39. HUMEDAD RELATIVA EN LA ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) PARA LOS PERÍODOS CRÍTICO, POST-CRÍTICO Y FINAL PARA CADA CICLO. ....	107
FIGURA 40. CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL $C_{CO_2-ZA}$ MEDIA PARA CADA UNO DE LOS CICLOS. ....	112
FIGURA 41. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN (- -) Y VENTILACIÓN (-) EN CADA UNO DE LOS CICLOS.....	116
FIGURA 42. REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS DE LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN (●) Y VENTILACIÓN (■) Y ENERGÍA DE CLIMATIZACIÓN (▲).....	118
FIGURA 43. GRÁFICO Q-Q NORMAL PARA LA CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C (A) Y PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C (B). ....	120
FIGURA 44. GRÁFICO Q-Q NORMAL PARA LA VARIABLE TRANSFORMADA DE CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> ( $C_{NH_3-ZA}$ ) TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C (A) Y PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C (B).....	122
FIGURA 45. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA VELOCIDAD INTERIOR ( $V_{IN-ZA}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA DE 26°C (-) Y 25°C (-). ....	126
FIGURA 46. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA VELOCIDAD DEL AIRE DE SALIDA ( $V_{EX}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA DE 26°C (-) Y 25°C (-). ....	126
FIGURA 47. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{PEX}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA DE 26°C (-) Y 25°C (-).....	127
FIGURA 48. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA ANIMAL ( $T_{ZA}$ ) PARA LAS TEMPERATURAS DE CONSIGNA DE 26°C (-) Y 25°C (-).....	128
FIGURA 49. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA ACTIVIDAD LIGERA ( $AA_L$ ) (-) Y ACTIVIDAD MODERADA ( $AA_M$ ) (- -) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C Y VALORES MEDIOS HORARIOS DE LA ACTIVIDAD LIGERA ( $AA_L$ ) (-) Y ACTIVIDAD MODERADA ( $AA_M$ ) (- -) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C. ....	129
FIGURA 50. CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) FRENTE A LA HR EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CORRELACIÓN LINEAL OBTENIDA ENTRE AMBAS VARIABLES. ....	134
FIGURA 51. CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ) FRENTE A LA CONCENTRACIÓN DE CO <sub>2</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{CO_2-ZA}$ ) Y CORRELACIÓN LINEAL OBTENIDA ENTRE AMBAS VARIABLES. ....	138
FIGURA 52. CONCENTRACIÓN DE NH <sub>3</sub> EN ZONA ANIMAL ( $C_{NH_3-ZA}$ ) FRENTE A LA CONCENTRACIÓN DE HR EN ZONA ANIMAL ( $HR_{ZA}$ ) Y CORRELACIÓN LINEAL OBTENIDA ENTRE AMBAS VARIABLES. ....	139

- FIGURA 53. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZ-MINUTALES DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{NH}_3$  EN ZONA ANIMAL ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) (–) Y LA TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, Y DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) (–) Y LA TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C. .... 148
- FIGURA 54. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZ-MINUTALES DE LA CONCENTRACIÓN  $\text{NH}_3$  EN ZONA ANIMAL ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) MEDIDA (+) Y MODELIZADA (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{NH}_3$  EN ZONA ANIMAL ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) MEDIDA (+) Y MODELIZADA (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C Y DE LA  $V_{\text{EX}}$  PARA LAS TEMPERATURAS DE 26°C (··) Y 25°C (··). .... 150
- FIGURA 55. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZ-MINUTALES DE  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ ) (–) Y LA TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, Y DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ ) (–) Y LA TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C. .... 153
- FIGURA 56. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZMINUTALES DE LA CONCENTRACIÓN  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2}$ ) MEDIDA (+) Y MODELIZADA (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, DE LA CONCENTRACIÓN DE  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ ) MEDIDA (+) Y MODELIZADA (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C Y DE LA  $V_{\text{EX}}$  PARA LA TEMPERATURA DE 26°C (··) Y 25°C (··). .... 154
- FIGURA 57. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZMINUTALES DE HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{\text{ZA}}$ ) (–) Y TEMPERATURA EN EL PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, Y DE LA HUMEDAD RELATIVA EN ZONA ANIMAL ( $HR_{\text{ZA}}$ ) (–) Y LA TEMPERATURA EN PASILLO EXTERIOR ( $T_{\text{PEX}}$ ) (– –) PARA UNA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C. .... 156
- FIGURA 58. EVOLUCIÓN DE LOS VALORES MEDIOS DIEZMINUTALES DE LA HUMEDAD RELATIVA ( $HR_{\text{ZA}}$ ) MEDIDOS (+) Y MODELIZADOS (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 26°C, DE LA HUMEDAD RELATIVA ( $HR_{\text{ZA}}$ ) MEDIDOS (+) Y MODELIZADOS (–) PARA LA TEMPERATURA DE CONSIGNA DE 25°C Y DE LA  $V_{\text{EX}}$  PARA LA TEMPERATURA DE 26°C (··) Y 25°C (··). .... 158

## SIMBOLOGÍA

### Caracteres latinos

<i>A</i>	Amplitud	
<i>B</i>	Coefficiente no estandarizado	
<i>C<sub>e</sub></i>	Calor específico del agua a 31°C	J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
<i>D</i>	Estadístico de Kolmorov-Smirnov	
<i>F<sub>c</sub></i>	Factor de conversión de horas a segundos	h s <sup>-1</sup>
gl	Grados de libertad	
<i>M</i>	Modelo	
<i>n</i>	Tamaño muestral	
<i>R</i>	Coefficiente de correlación	
<i>R<sup>2</sup></i>	Coefficiente de determinación	
<i>r<sub>ho</sub></i>	Coefficiente de Spearman	
<i>S</i>	Sección	m <sup>2</sup>
<i>S<sub>B</sub></i>	Sistema acotado	
<i>S<sub>L</sub></i>	Log-normal del sistema	
<i>S<sub>U</sub></i>	Sistema sin límites	
<i>p</i>	Valor crítico	
<i>Q<sub>V</sub></i>	Caudal extraído por el ventilador	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
<i>T</i>	Periodo	
<i>T'</i>	Tolerancia	
<i>T<sub>A</sub></i>	Tiempo de actividad	s
<i>T<sub>A1</sub></i>	Temperatura del corral 1	°C
<i>T<sub>A2</sub></i>	Temperatura del corral 2	°C
<i>T<sub>A3</sub></i>	Temperatura del corral 3	°C
<i>T<sub>A4</sub></i>	Temperatura del corral 4	°C
<i>T<sub>A5</sub></i>	Temperatura del corral 5	°C
<i>T<sub>A6</sub></i>	Temperatura del corral 6	°C
<i>T<sub>A7</sub></i>	Temperatura entre corrales 3 y 4 a 0 m	°C
<i>T<sub>A8</sub></i>	Temperatura pasillo central	°C
<i>T<sub>A9</sub></i>	Temperatura del corral 7	°C
<i>T<sub>A10</sub></i>	Temperatura entre corrales 3 y 4 a 1 m	°C
<i>T<sub>A13</sub></i>	Temperatura entre corrales 3 y 4 a 2 m	°C
<i>T<sub>C</sub></i>	Temperatura de consigna	°C
<i>T<sub>D</sub></i>	Intervalo de almacenamiento de datos	

$t_1$	Estadístico de Welch	
$t_2$	Estadístico de Games-Howell	
$t_3$	Estadístico prueba T	
$V$	Variable	
$V_m$	Velocidad media	$\text{m s}^{-1}$
$V_{m\acute{a}x}$	Valor máximo	
$V_{m\acute{i}n}$	Valor mínimo	
$W_1$	Estadístico de Levene	
$W_2$	Brown-Forsythe	
$Z$	Transformación de Fisher	

**Caracteres griegos**

$\alpha$	Expresión senoidal	
$\beta$	Coefficiente estandarizado	
$\gamma$	Parámetro de Johnson	
$\varepsilon$	Parámetro de Johnson	
$\lambda_{BC}$	Potencia lambda para transformación de Box Cox	
$\lambda_j$	Parámetro de Johnson	
$\rho$	Densidad del agua a 31°C	$\text{kg m}^{-3}$
$\Phi$	Ángulo de fase inicial	rad
$\omega$	Pulsación	$\text{rad min}^{-1}$

**ABREVIATURAS**

$AA$	Actividad animal	s
$AA_1$	Actividad animal sensor de presencia 1	s
$AA_2$	Actividad animal sensor de presencia 2	s
$AA_3$	Actividad animal sensor de presencia 3	s
$AA_4$	Actividad animal sensor de presencia 4	s
$AA_L$	Actividad animal ligera	s
$AA_M$	Actividad animal moderada	s
$AE$	Error medio	
$CO_2$	Dióxido de carbono	
$C_{CO_2}$	Concentración de dióxido de carbono	ppm
$C_{CO_2-S}$	Concentración de dióxido de carbono en la salida del aire	ppm
$C_{CO_2-ZA}$	Concentración de $CO_2$ en la zona animal	ppm
$C_{NH_3}$	Concentración de amoníaco	ppm

$C_{NH_3-ZA}$	Concentración de CO <sub>2</sub> en la zona animal	ppm
$CPC$	Caudal del fluido calefactor	m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>
CTE	Constante	
D	Estadístico de normalidad	
DW	Estadístico de Durbin Watson	
FIV	Factor de Inflación de la Varianza	
HR	Humedad relativa	%
$HR_{ZA}$	Humedad relativa en la zona animal	%
$HR_S$	Humedad relativa en la salida del aire	%
<i>Máx.</i>	Máximo	
<i>Med.</i>	Media	
<i>Mín.</i>	Mínimo	
$NH_3$	Amoniaco	
$PSC$	Potencia suministrada a las placas calefactoras	W
P.V.	Peso vivo	kg
$RME$	Error medio relativo	
$RMSE$	Raíz del error cuadrático medio	
$SD$	Desviación estándar	
$SDE$	Desviación estándar del error	
$SE$	Error estándar	
SPSS	Statistical Product and Service Solutions	
$THC$	Sistema de control temperatura-humedad	
$T_{PCE}$	Temperatura del fluido calefactor en la entrada	°C
$T_{PCS}$	Temperatura del fluido calefactor en la salida de la sala	°C
$T_E$	Temperatura en la entrada de aire	°C
$T_{PEX}$	Temperatura del pasillo exterior	°C
$T_{ZA}$	Temperatura en la zona animal	°C
$V_{EX}$	Velocidad del aire de salida	m s <sup>-1</sup>
$V_{INZA}$	Velocidad del aire en la zona animal	m s <sup>-1</sup>



# Capítulo 1.

## Introducción

---





## Capítulo 1. Introducción

---

La producción porcina es un sector en constante evolución. Las granjas deben reestructurarse para competir en el mercado actual, dotándose de mayores niveles de mecanización y automatización, y al mismo tiempo hacer frente a las continuas modificaciones de las normativas de bienestar animal. La cambiante regulación, cada vez más estricta, junto con un perfil de consumidor cada vez más exigente, obliga a que los productos de origen animal provengan de animales que hayan estado en condiciones óptimas durante su vida. Además el ganadero se enfrenta a mayores exigencias medioambientales. En este contexto, el sector se enfrenta al desafío de encontrar sistemas más eficientes que minimicen el impacto que la actividad genera, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero y teniendo en cuenta el bienestar animal. Para ello, los productores deberán proporcionar al ganado porcino unos alojamientos e instalaciones adecuados, lo cual pasa por un control térmico óptimo y una buena calidad del aire, caracterizada por el contenido en gases y microorganismos, y adaptado a sus necesidades fisiológicas.

Los factores que influyen en la elección de los sistemas o tipos de alojamiento son múltiples e incluyen consideraciones de tipo climático, aunque también se debe considerar la salud, el bienestar y el confort de los animales, la provisión y distribución del alimento y el manejo de los residuos producidos.

El ambiente en el interior de los alojamientos ganaderos es un elemento que requiere especial atención ya que puede influir de forma negativa sobre múltiples aspectos como la salud y bienestar animal, la producción, la salud de los trabajadores o el medioambiente. A su vez, las características ambientales del interior de los alojamientos, temperatura, humedad relativa, concentración de gases, etc., se ven afectadas por diversos factores. El diseño y las características técnicas de los alojamientos y sus instalaciones, la cabaña ganadera, el estado de desarrollo de los animales, la actividad animal, el tipo de alimentación y su forma de distribución, el manejo de los residuos producidos, definen en gran medida el ambiente interior.

Los animales están directamente expuestos al aire y por lo tanto, a sus contaminantes y por tanto la piel, los ojos y la mucosa del tracto respiratorio resultan

directamente afectados e irritados, lo que favorece la aparición de enfermedades (Kim *et al.*, 2005; Ni *et al.*, 2009). Los contaminantes ambientales provienen de la descamación de la piel, del alimento, de la cama y de las heces y orina (Echevarría *et al.*, 2009). La descomposición anaeróbica del estiércol produce gases que pueden ser perjudiciales para la salud y la productividad de los animales entre los cuales el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) son los más comunes. Los niveles de emisión de estos dependen de un gran número de factores: el manejo de purín, el sistema de ventilación, el estado de desarrollo de los animales. El amoníaco es uno de los gases que requiere un estudio más profundo debido a sus elevadas emisiones y a la influencia que los elevados niveles de concentración tienen sobre la salud y la producción de los animales, especialmente en porcino.

Debido a todos estos aspectos el control de la concentración de amoníaco en explotaciones porcinas tiene una gran importancia. Sin embargo su detección es compleja, cara y presenta múltiples problemas, y más particularmente la detección de amoníaco en continuo ya que precisa de equipos extremadamente caros y con elevados costes de mantenimiento. En este sentido, se han realizado esfuerzos en relacionar de forma fiable la concentración de  $\text{NH}_3$  en el interior de los alojamientos con otras variables de más fácil medida, con el fin de utilizarlas para el control de sus instalaciones.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es el conocimiento del ambiente en el interior de los alojamientos de una explotación porcina de cría de lechones. Además se persigue la obtención de interacciones entre las variables ambientales, con especial atención a la concentración de  $\text{NH}_3$  y su estimación a partir de otras variables de más fácil medición y bajo coste, factibles en alojamientos ganaderos. Se desarrollarán modelos de regresión lineal entre las distintas variables ambientales que permitan inferir unas en función de las otras de modo que, minimizando el número de sensores y manteniendo la precisión, caractericen la calidad ambiental global del alojamiento y permitan que, mediante la observación y el análisis de todos los datos disponibles, sea posible anticiparse a los cambios que se produzcan.

# **Capítulo 2.**

## **Antecedentes**

---





## Capítulo 2. Antecedentes

---

La intensificación de la producción animal en los últimos años ha consistido, en primer lugar, en cambios en los métodos de producción. Se fue pasando de métodos relativamente tradicionales, en los que se utilizaba mano de obra para llevar a cabo tareas cotidianas como la alimentación y la retirada del estiércol, a nuevos sistemas de confinamiento. En ellos se mantiene a los animales en recintos cubiertos y se utilizan distintos accesorios y sistemas automatizados, en lugar de la mano de obra, para la realización de muchas de las tareas rutinarias. En segundo lugar, a medida que se iba produciendo este cambio, la producción se iba concentrando en un número cada vez menor de explotaciones. La intensificación, en este sentido, también ha estado acompañada de un gran incremento en la producción, que ha acompañado a la demanda creciente de productos cárnicos.

El desarrollo de la ganadería hacia la intensificación ha originado un aumento de la problemática medioambiental ligada a la actividad pecuaria en las zonas donde el crecimiento ha sido desordenado. Por otra parte, en las últimas décadas ha crecido, en las sociedades más civilizadas, un sentimiento de conciencia sobre la protección, el respeto y la defensa de los animales, lo que trajo consigo el desarrollo de nuevas prácticas en el trato con los animales, especialmente con los cerdos (De Greef *et al.*, 2011).

En la producción ganadera, el bienestar animal es uno de los mayores retos de cara al futuro, junto con la seguridad alimentaria y el respeto por el medio ambiente. Por ello, el bienestar animal debe ser medido de forma objetiva y desde diferentes puntos de vista, teniendo en cuenta tanto parámetros productivos como de comportamiento o estrés. En este sentido, el control del ambiente interior de las granjas es importante para el bienestar, la salud y la productividad de los animales, incluyendo, entre otros parámetros, la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del aire y su calidad en cuanto al contenido en polvo orgánico y gases nocivos como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y el ácido sulfhídrico ( $\text{SH}_2$ ) emitidos durante la biodegradación de los purines y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) producto de la respiración de los animales. Por lo tanto, el ambiente en el interior de estos alojamientos es un elemento que requiere especial atención ya que puede influir sobre múltiples aspectos como la salud y bienestar animal, y por tanto en

la producción (Cargill y Skirrow, 1997; Soldatos *et al.*, 2005), la salud de los trabajadores (Whyte, 1993; Pearson y Sharples, 1995) o el medioambiente (van Breemen *et al.*, 1982; Buijsman y Erisman, 1988), pudiendo condicionar la eficiencia técnica y económica del alojamiento (Forcada *et al.*, 2014).

Experimentos llevados a cabo por Lee *et al.* (2005) en explotaciones comerciales mostraron como respuesta que los cerdos ubicados en un ambiente limpio consumen más alimento y crecen más rápido que los alojados en un ambiente sucio. Sus resultados coinciden con los obtenidos por otros estudios que muestran reducciones del 10% al 25% en tasas de crecimiento de cerdos alojados en entornos comerciales en comparación con las obtenidas en instalaciones altamente saneadas (Drummond *et al.*, 1980, Coffey y Cromwell, 1994; Ekkel *et al.*, 1995). En este sentido, debe ser el hombre quien se comprometa a aportar las condiciones ambientales que garanticen el bienestar animal y, en consecuencia, el rendimiento óptimo de los animales.

A su vez, las características ambientales del interior de los alojamientos, temperatura, humedad relativa, concentraciones de gases, etc., se ven afectadas por diversos factores como el diseño y las características técnicas de los alojamientos y sus instalaciones (Zhang *et al.*, 2005), la cabaña ganadera y el estado de desarrollo de los animales (Kim *et al.*, 2007; Pedersen *et al.*, 2008), la actividad animal, el tipo de alimentación y su forma de distribución (Robertson *et al.*, 2002) o el manejo de los residuos producidos en el alojamiento (Ni *et al.*, 1999a).

En los alojamientos para ganadería intensiva, los animales están directamente expuestos al aire y, por tanto, a sus contaminantes, lo que favorece la aparición de efectos indirectos, como el desarrollo de enfermedades (Kim *et al.*, 2005; Ni *et al.*, 2009). Por tanto, calefacción y ventilación deben mantener las temperaturas recomendadas así como una buena calidad del aire, caracterizado por la concentración de gases y la cantidad de polvo y microorganismos. Estos parámetros están influenciados por las interacciones con el ambiente exterior por una parte, y del ganado, el sistema de climatización y el alojamiento por otra (Soldatos *et al.*, 2005).

La climatización de estos alojamientos conlleva un elevado consumo energético que afecta directamente a los costes de la explotación. El control de las instalaciones, comúnmente equipados con equipos de calefacción y ventilación para mantener la calidad del aire interior y un adecuado ambiente térmico (van Wagenberg *et al.*, 2005),

implica muchos problemas. Las instalaciones de calefacción y ventilación interactúan entre sí, de modo que parte del aporte de calor de la calefacción se extrae mediante el sistema de ventilación para la eliminación de gases nocivos. Aunque el incremento de temperatura que produce el aporte de calor de la calefacción y los propios animales permite mayor capacidad del aire para retener agua, la respiración de éstos da lugar a un incremento de la humedad que es necesario extraer mediante el sistema de ventilación. A ello hay que agregar las concentraciones de gases nocivos como el CO<sub>2</sub> o el NH<sub>3</sub> que se generan en el interior del alojamiento y que la ventilación se encarga de extraer. Como se deduce, la coordinación de las instalaciones de calefacción y ventilación es crucial tanto para la adecuación a los requerimientos ambientales como para la minimización de los costes originados.

La temperatura es el factor predominante el clima. Los cerdos reaccionan a condiciones de estrés provocadas por las malas condiciones ambientales mediante la activación de mecanismos fisiológicos para mantener la homeostasis y, al hacerlo, la productividad puede verse comprometida (Lee *et al.*, 2005). De hecho, Le Dividich y Herpin (1994), apoyándose en trabajos precedentes en ambiente fríos, anteponen el confort térmico de los animales frente a la calidad del aire, indicando ventilaciones por debajo de las mínimas recomendadas con lo que se obtienen elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> y NH<sub>3</sub>. Pero, además del control térmico, el manejo ambiental incluye el mantenimiento de una buena calidad del aire, caracterizada, como ya se indicó, por el contenido en gases, partículas sólidas y microorganismos. En este sentido, el éxito de la climatización radica, en gran medida, en su sistema de control, por lo que la herramienta más eficiente para asegurar una producción óptima en alojamientos ganaderos es un sistema de control ambiental bien diseñado (Parsons *et al.*, 2007; Garcimartin *et al.*, 2007).

Además del ambiente interior, las emisiones de gases desde los alojamientos para el ganado y sus efectos sobre el medio ambiente han sido, y siguen siendo, objeto de numerosos estudios con el fin de proporcionar información precisa acerca de su magnitud y relevancia así como para desarrollar opciones para su mitigación (Ogink *et al.*, 2013). De acuerdo con esto, las emisiones gaseosas de alojamientos ganaderos son una de las principales preocupaciones ambientales en todo el mundo y un número creciente de países ya han introducido una legislación que tiene como objetivo reducir

la emisión de contaminantes en el diseño de nuevas instalaciones de producción. Los productores están obligados a elegir entre una gama de soluciones técnicas especificadas para minimizar su impacto ambiental. Sin embargo, la adopción de estas soluciones a menudo puede implicar costes importantes.

## **2.1 EVOLUCIÓN Y SITUACIÓN DEL SECTOR PORCINO ESPAÑOL**

La ganadería española ha experimentado un profundo cambio en las últimas décadas a nivel de tecnificación, mejora de la calidad y sanidad de las producciones y orientación en los mercados.

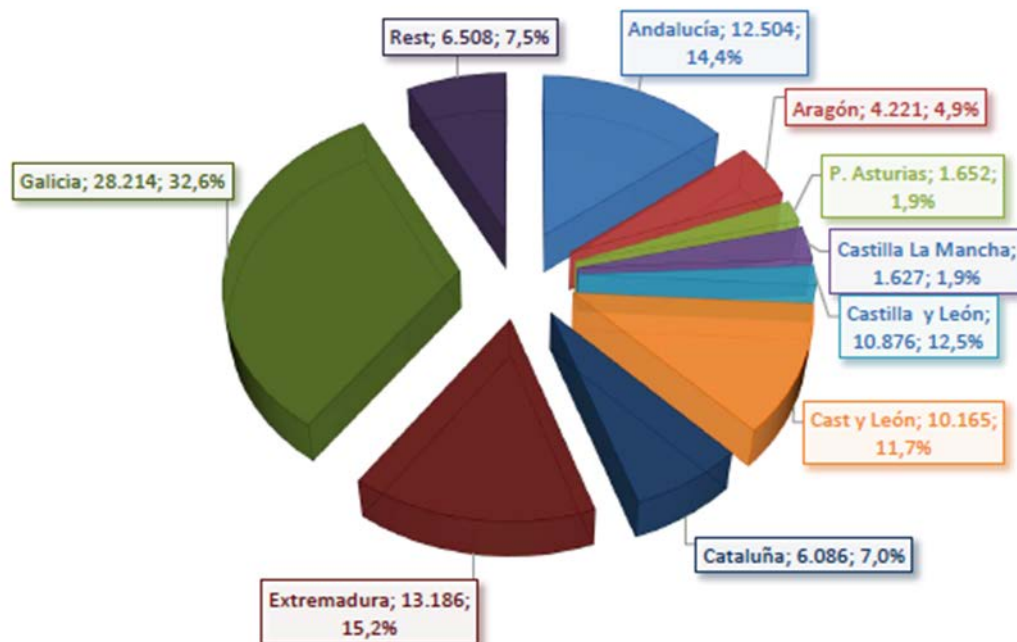
En la década de los 50, la producción porcina, al igual que el resto de las producciones ganaderas, provenía de granjas familiares orientadas a la subsistencia. En los años 60 se produce una gran transformación del sector promovida por los cambios demográficos, aumento de la renta per cápita, el aumento de la población en las zonas urbanas y el aumento de la demanda de alimentos de origen animal, principalmente aves y porcino. Estos cambios se consolidan en la década siguiente con la aparición de sistemas de producción de integración. Además se sustituyen las razas autóctonas por razas con mejores índices productivos.

La década de los 80 estuvo marcada por la entrada de España en la Unión Europea y por un mayor control sanitario que favoreció la erradicación de la peste porcina africana, la cual impedía las exportaciones al resto de la UE, siendo eliminadas las barreras con el comercio internacional desde entonces. La reforma de la Política Agrícola Común (PAC), en los años 90, supone la implantación de una estricta normativa de bienestar animal, en la cría y transporte del cerdo, y para la reducción de la contaminación medioambiental generada por la actividad. Además se implanta un riguroso control en la alimentación de los animales, prohibiendo la incorporación de proteínas de origen animal en los piensos, y de identificación animal que garanticen la seguridad y trazabilidad de la producción (Instituto de Estudios Cajamar, 2004).

El sector porcino se ha convertido en el sector con mayor peso en la economía ganadera española, con un ritmo de crecimiento el doble que la producción final ganadera, situándose actualmente en un 36,4% de la misma.

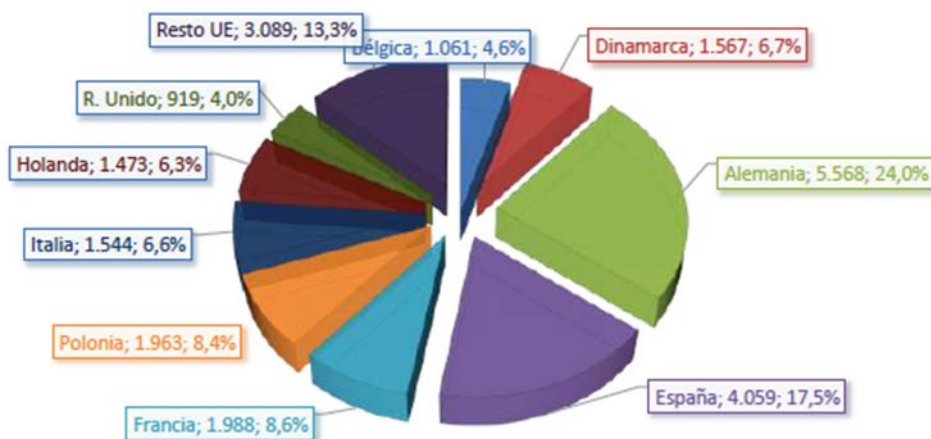
Según los últimos datos publicados por el Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (MAPAMA), el pasado año, el número total de

explotaciones porcinas se situó en las 86.641, de las cuales 14.213 son en régimen extensivo, 68.980 en intensivo y el resto mixtas. A medida que el número de explotaciones disminuye, aumenta la capacidad de éstas. En el año 2007 el número de explotaciones de tamaño reducido (menos de 4,8 UGM) y del grupo primero (Capacidad hasta 120 UGM) sumaban 57.021, mientras que en 2016 habían disminuido hasta las 36.521. Por contra, las explotaciones del grupo segundo y tercero (capacidad entre 120 y 360 UGM y entre 360 y 720 UGM, respectivamente), pasaron de las 8.901 en 2007 a las 10.082 en 2016. Las explotaciones de mayor tamaño se encuentran ubicadas en Catalunya, Aragón y Castilla y León mientras que las de menor tamaño se encuentran en Extremadura, Andalucía y Galicia. Las explotaciones clasificadas en el Grupo especial (explotaciones de selección, de multiplicación, centros de agrupamiento de reproductores para desvieje, centros de inseminación artificial, explotaciones de cría de reproductores, las de transición de reproductoras primíparas y los centros de cuarentena) y desconocido han aumentado, pasando de las 33.639 de 2007 a las 39.938 actuales. En este caso, más del 60% de este tipo de explotaciones se ubican en Galicia. En la Figura 1 se muestra la distribución actual de las explotaciones porcinas españolas por comunidades autónomas.



**Figura 1. Distribución del número total de explotaciones de ganado porcino por comunidades autónomas a 01/03/2017. (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca, alimentación y Medio Ambiente, 2017).**

A nivel europeo, España es el segundo país productor con un 17,5% de las toneladas producidas (MAPAMA, 2017), por detrás de Alemania, y es el primer país de la UE en censo, con más del 19%. La Figura 2 muestra los principales países productores de porcino en Europa.



**Figura 2. Producción de carne de cerdo en la Unión Europea durante el año 2016 en miles de toneladas. (Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca, alimentación y Medio Ambiente, 2017).**

A nivel mundial, la UE-28 es el segundo productor de carne de porcino, después de China, situándose España como la cuarta potencia productora (después de Alemania, EEUU y China). Según estadísticas de la Organización Interprofesional Agroalimentaria del Porcino de Capa Blanca (interporc) en 2016, la carne de porcino española ha registrado un nuevo hito de producción, al superar los 4 millones de toneladas. Con un crecimiento del 5,2% con respecto al año 2015. Las exportaciones del sector porcino se han incrementado de forma importante en los últimos años, con un crecimiento del 68% en volumen y del 84% en valor. Las ventas al exterior crecieron un 21% en volumen y un 16,5% en valor. Además China se ha convertido en el primer mercado exterior por volumen, concentrando algo más del 20% de las exportaciones. La Unión Europea sigue siendo el principal mercado para España situándose Francia en el primer puesto del mercado en facturación, con 759 millones de euros. Estos resultados son debidos a la confluencia de distintos factores como la unidad del sector, el modelo de producción sostenible y segura, la especialización y profesionalización en todas las áreas de la cadena de valor y la visión global que ha llevado a producir pensando en el mundo como un único mercado.

## 2.2 VARIABLES AMBIENTALES

### 2.2.1 Temperatura

La temperatura es la componente predominante en el ambiente interior ya que va a incidir sobre el crecimiento de los animales debido a su efecto sobre la eficiencia con la que los nutrientes de la dieta son utilizados para los múltiples procesos metabólicos del organismo. En consecuencia, es conveniente mantener a los animales dentro de la zona termoneutra (TNZ), la cual fue definida por la International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR, 1999) como un rango de temperaturas ambientales dentro de las cuales la tasa metabólica es mínima e independiente de la temperatura. En un entorno de la TNZ, la producción de calor total del animal se puede calcular como la diferencia entre la entrada de la energía metabolizable y la energía retenida en productos y el crecimiento de tejido corporal (Bastian, 1992). Quiniou *et al.* (2001) investigaron la influencia de la temperatura ambiente en el engorde de cerdos de 48 a 75 kg dentro de un rango de temperaturas de 12 a 29 °C. Expresado con respecto a una temperatura ambiente de 20 °C, la disminución en la producción total de calor se calculó en un 1,2% por °C. Por su parte, Collin *et al.* (2001), con temperaturas ambientales de 23, 25 y 27 °C y cerdos de 25 kg, cuantificaron esta disminución en un 1,7% por °C. En otro experimento, Ota *et al.* (1982), con lechones entre 4 y 17 kg y una temperatura ambiente de 18 a 29 °C, establecieron la disminución en la producción de calor total en un 3,3% por °C, lo que demuestra que la influencia de la temperatura es mucho mayor en los cerdos pequeños que en los grandes. Esto supone que va a tener una mayor influencia en la fase de crecimiento que se estudia en el presente trabajo (lechones destetados con un peso comprendido entre 6 y 20 kg) que en la posterior etapa de cebo.

Aunque los límites de la TNZ se expresan principalmente en temperatura del aire, su velocidad está considerada como un factor importante, ya que es una componente de la pérdida de calor por convección y por lo tanto va a tener una gran influencia en el confort térmico del animal (Le Dividich y Herpin, 1994). Cuando el ambiente térmico del lechón excede los límites de la TNZ se espera que el rendimiento del animal (consumo de alimento, crecimiento, y por tanto, índice de conversión) se deteriore (Quiniou *et al.*, 2000) y, en determinadas circunstancias, suponga un mayor riesgo para la salud animal.

Las recomendaciones de temperatura para lechones en fase de transición varían desde los 30-32 °C hasta los 19-25 °C para 5 y 20 kg de p.v. respectivamente (Muirhead and Alexander, 1997). A estos efectos, Le Dividich y Herpin (1994) distinguen dos periodos en esta fase: el periodo crítico correspondiente a las dos primeras semanas siguientes al destete, durante las cuales los lechones consumen sólo comida seca por primera vez, ya que en la paridera la alternaban con la leche materna, y el periodo post-crítico donde ya se establece la ingesta regular de alimentos. Al inicio del periodo crítico se sugiere que la temperatura crítica inferior se encuentre en el intervalo de 26-28°C (Le Dividich and Herpin, 1994), descendiendo a 24°C en las dos semanas siguientes (Close and Stanier, 1984). Durante el periodo post-crítico, una vez regularizada la ingesta de alimentos y superados los problemas de diarrea como consecuencia de los cambios en la alimentación, la temperatura del aire en la sala de destete puede ser reducida rápidamente, entorno a 2-3 °C por semana, hasta alcanzar la temperatura que se mantendrá hasta que los lechones abandonen la sala (Le Dividich, 1981; Close and Stainer, 1984; Feenstra, 1984).

Daskalov *et al.* (1997) demostraron que la temperatura crítica baja (LCT) de cerdos destetados puede reducirse significativamente cuando se usa calefacción en el suelo, y al mismo tiempo, puede incrementarse considerablemente la eficiencia energética del sistema. Estas investigaciones demuestran la necesidad de nuevos métodos de diseño de control del microclima que utilizan dispositivos de microprocesadores sofisticados para la creación de sistemas de regulación de entorno eficaz (Soldatos *et al.*, 2005). A ello hay que añadir el empleo de cubiertas en las zonas de calefacción localizada que se emplean para proporcionar una zona más cálida en parte de la superficie ocupada por animales.

Las estrictas condiciones ambientales demandadas por los lechones en climas templados, especialmente durante el período crítico, se consiguen mediante la combinación de las instalaciones de calefacción, para el aporte de calor, y de ventilación, generalmente forzada, para la renovación de aire. La temperatura es el parámetro ambiental más utilizado, aunque también se pueden encontrar instalaciones de control que incluyen también la humedad relativa, así como las variaciones de ambas (Forcada *et al.*, 2014). De este modo, en invierno las condiciones ambientales óptimas se conseguirán restringiendo la ventilación al mínimo necesario para limitar la

extracción de calor al tiempo que se extrae la humedad y gases contaminantes, mientras que en verano resultará fundamental eliminar el exceso de calor del alojamiento mediante la ventilación. También es frecuente establecer una ventilación máxima para limitar las corrientes de aire sobre los animales lo cual podría producir enfermedades y problemas de conducta (agresiones).

### **2.2.2 Humedad Relativa**

La humedad relativa también es utilizada generalmente como indicador de la calidad del aire en el alojamiento ya que un adecuado control de la humedad garantizará unas concentraciones de gases adecuadas (Guo *et al.*, 2001). Niveles extremos de humedad, tanto superiores como inferiores a los niveles adecuados, son perjudiciales para la producción animal, la salud de los trabajadores y los alojamientos. En condiciones óptimas de temperatura, oscilaciones de humedad relativa entre el 50 y el 75% no tienen ninguna influencia sobre el bienestar animal (Kamada y Notsuki., 1987). Una humedad relativa inferior al 40% perjudica a los cerdos porque seca las mucosas, produce tos irritante y reduce la ingesta de alimentos. Una humedad relativa por encima del 80% presenta un efecto indirecto porque agudiza los efectos de las temperaturas extremas (Forcada *et al.*, 2009). Sin embargo, la humedad tiene una influencia mucho menor sobre el crecimiento del lechón que la temperatura. De hecho, la humedad del aire no se espera que tenga mucha influencia sobre los lechones destetados mantenidos dentro de la zona termoneutra (Kamada y Notsuki, 1987). Guo *et al.* (2001) aplicaron dos estrategias de control del clima en una explotación porcina: una basada en el control de la temperatura y otra basada en el control de la temperatura y la humedad. El resultado obtenido mostró que, en climas fríos, el rendimiento de los cerdos no se ve afectado por las estrategias de control aplicadas.

A pesar de esta escasa incidencia directa, elevados contenidos de humedad pueden originar condensación sobre las superficies del alojamiento y sobre los animales. La humedad acumulada en la estructura del alojamiento puede acelerar su corrosión y, en consecuencia, reducir la longevidad del edificio (Zhang, 1994), contribuyendo al deterioro del alojamiento y del equipamiento causado por la condensación interior (ASAE, 1990). Además, un alto contenido de humedad contribuye al crecimiento de organismos patógenos. De hecho Schauberger *et al.* (2000) identificaron las superficies

húmedas como uno de los principales problemas durante periodos fríos en latitudes medias dentro de las granjas e indican que la evaporación puede ser interpretada como un sumidero de calor sensible y una fuente de calor latente. Por tanto, si la condensación se produce sobre el lechón, parte del calor del mismo se empleará en la evaporación del agua sobre su piel, proceso que sustraerá calor del lechón con su consecuente enfriamiento y mayor susceptibilidad a contraer enfermedades. Con altas temperaturas ambientales, Warriss (2003) señala que es importante que la ventilación del alojamiento sea adecuada para prevenir incrementos de la humedad que dificulte la pérdida de calor por evaporación en los cerdos.

Por tanto, la humedad es una variable ambiental muy importante, no solo por su efecto directo sobre el comportamiento de los animales, sino también por sus efectos sobre la dinámica energética del propio clima interior.

Distintos autores propusieron humedades óptimas para los diferentes estados de producción porcina. Así, Eguinoa *et al.* (2005), aunque no define expresamente el grado de humedad óptimo en transición, propone un rango comprendido entre el 50 y el 75% para acabado. Por su parte, Fuentes (1992) o Forcada (1997) recomiendan, para lechones de 6 a 20 kg de p.v., niveles del 60% y entre el 65 y el 75 % respectivamente.

### **2.2.3 Dióxido de Carbono**

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es uno de los gases contaminantes más importantes en los alojamientos para el ganado (Ni *et al.*, 1999c). La producción total de CO<sub>2</sub> es la adición del emitido por los animales en la respiración y la liberada por el estiércol acumulado debajo del alojamiento (Blanes y Pedersen, 2005). En este sentido, su producción depende del peso animal, de la composición de la alimentación, del nivel de producción y del dióxido de carbono producido a partir del estiércol. Por otra parte Calvet *et al.* (2011) señalan que el dióxido de carbono producido por los animales depende de peso del animal y la ganancia diaria, y está fuertemente afectada por las variaciones en la actividad de los animales debido a que este gas se produce como resultado del metabolismo animal. Se considera que del total producido, casi el 90% es debido a la respiración (Pedersen *et al.*, 2008a) y su tasa de producción varía a lo largo del día en función de la actividad del animal (McCracken y Caldwell, 1980; Pedersen y Takai, 1997; Pedersen and Rom, 1998; Blanes y Pedersen, 2005). Ni *et al.* (1999c)

establecieron un ratio del 37,5 % entre el CO<sub>2</sub> liberado por el purín y la tasa TCER (CO<sub>2</sub> exhalado por la respiración del animal, cuando éste se encuentra en condiciones tranquilas) en una granja porcina con suelo emparrillado y ventilación mecánica.

La producción de CO<sub>2</sub> a partir del animal, medida por Ni *et al.*, (1999a) mediante la TCER (Tranquil CO<sub>2</sub> Exalation Rate) se deriva de su tasa de metabolismo de la energía, que está relacionada con el nivel de alimentación y la composición de nutrientes de la dieta (Brouwer, 1965). Asimismo, Pedersen *et al.* (2008) establecieron que la producción de CO<sub>2</sub> por hpu (heat production unit) es mucho menor en cerdos por debajo de 40 kg y cerdas que para el crecimiento de los cerdos de acabado. En consonancia con esto, Pedersen *et al.* (2008) señalan que, como la producción de CO<sub>2</sub> por hpu aumenta con el incremento de la respiración y este con la masa corporal, la unidad de producción de CO<sub>2</sub> también aumenta con la masa corporal.

La producción de CO<sub>2</sub> de los animales en condiciones normales de granja tiene normalmente una variación diurna de +/-20% (Pedersen *et al.*, 2008) y su estimación puede ser mejorada mediante la inclusión en los cálculos de la variación sinusoidal diaria de la actividad animal (Blanes y Pedersen, 2005). Por su parte, Wachenfelt *et al.* (2001) mostraron que la producción de CO<sub>2</sub> durante la noche es sólo el 66% de la producción en el período diurno mientras que Pedersen y Rom (1998) obtuvieron que el 55% de la variación diurna de CO<sub>2</sub> podría ser debido a la variación en la actividad animal. Osada *et al.* (1998) constató la fluctuación diaria, midiendo valores de emisión en las horas pico (11:00-12:00 h) de hasta 2 veces la observada a las 06:00 h, estimando la emisión total durante un período de engorde de 8 semanas (de 32 a 105 kg de p.v.) en 5540 g/cerdo. Ni *et al.* (1999a) midieron valores medios diarios de CO<sub>2</sub> exhalado aproximadamente un 10% más altos que durante los períodos en los que los cerdos estaban tranquilos. Jeppsson (2002) pone de manifiesto una gran variación diurna en la emisión de CO<sub>2</sub> en edificios de cebo, no aislados y con cama, lo cual se explica por la variación en la temperatura del aire en el interior y la actividad de los animales.

El CO<sub>2</sub> liberado a partir de estiércol en los alojamientos porcinos se ha considerado poco importante (Feddes y DeShazer, 1988; Jacobson *et al.*, 1992) y a veces totalmente ignorado (CIGR, 1992). Muchos investigadores creen que la cantidad de liberación de CO<sub>2</sub> a partir de estiércol era menos del 5% de los que exhala la respiración animal (Anderson *et al.*, 1987; Feddes y DeShazer, 1988; van Ouwerkerk y Aarnink, 1992;

van't Klooster y Heitlager, 1994; van Ouwerkerk y Aarnink, 1995). Sin embargo, esta sentencia no se basa en los datos de medición. Aunque se divulgaron con frecuencia las concentraciones de CO<sub>2</sub> en alojamientos porcinos, la cantidad real de CO<sub>2</sub> liberado en su interior no se ha investigado con profundidad (Ni *et al.*, 1999a; Anderson *et al.*, 1987; van Ouwerkerk y Aarnink, 1992). En el estudio de van Ouwerkerk y Aarnink (1992), la producción de CO<sub>2</sub> calculado procedente de la liberación del estiércol fue sólo el 2,5% de la producción total. En un informe posterior, los mismos autores concluyeron que la liberación de CO<sub>2</sub> a partir de purines suponía entre el 2 y el 4% de la producción total (van Ouwerkerk y Aarnink, 1995).

Diversos autores establecieron variaciones en la producción de CO<sub>2</sub> en función del tipo de alojamiento. Jeppsson (2000), en alojamientos con cama indica que la producción de dióxido de carbono puede ser tan alta como la producción de los animales mientras que Aarnink *et al.* (1992) en alojamientos sin cama establece que la producción de dióxido de carbono procedente del estiércol estará normalmente por debajo de 4% de la producción total de dióxido de carbono.

El dióxido de carbono se ha utilizado durante mucho tiempo como un parámetro que determina la tasa de ventilación mínima, debido a su importancia en las cualidades del aire interior, ya que puede provocar la asfixia de los animales si el sistema de ventilación falla durante un período aproximado de 6-8 h (Donham *et al.*, 1982). Además, enfermedades respiratorias como estornudos, tos o neumonías son mayores en animales en circunstancias donde las concentraciones de CO<sub>2</sub> están entre 2000 y 9000 ppm comparadas con aquellas en las que los niveles están entre 1000 y 3000 ppm (Busse, 1993).

Diversos autores registraron concentraciones de CO<sub>2</sub> en el aire interior entre 350 y 4350 ppm en alojamientos con ventilación forzada (Anderson *et al.*, 1987; Jacobson *et al.*, 1996), y entre 1.430 y 3050 ppm para alojamientos con ventilación natural (van 't Klooster y Heitlager, 1994; Jacobson *et al.*, 1996).

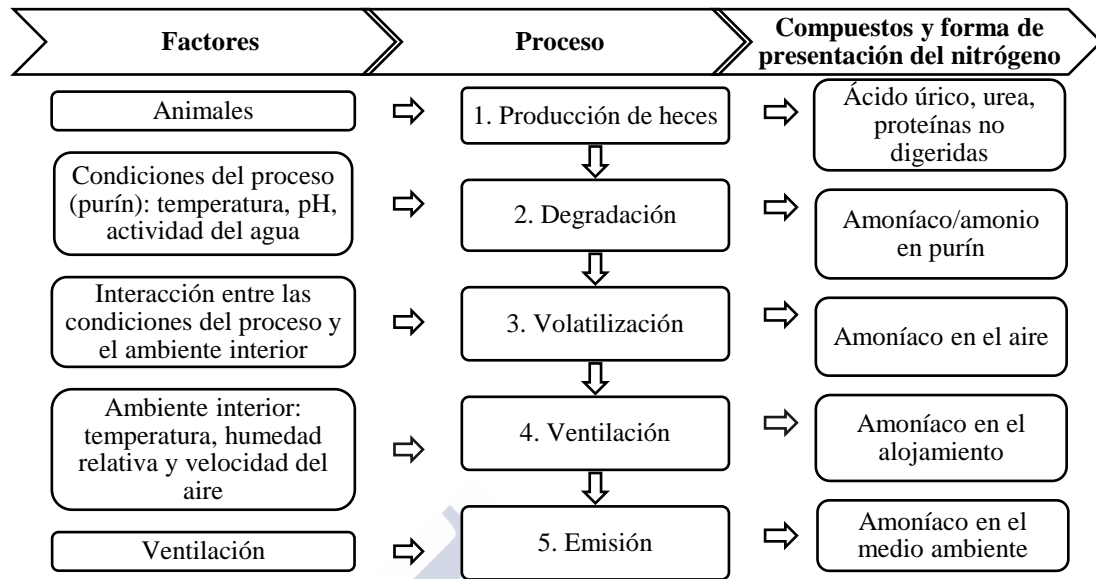
Por lo que respecta a las concentraciones máximas de CO<sub>2</sub> en el interior del alojamiento, diversos autores sugirieron concentraciones de CO<sub>2</sub> de seguridad máxima de 3.000 ppm (Bruce, 1981; CIGR, 1992; Nicks *et al.*, 1993; Cargill y Skirrow, 1997). Esta cifra coincide con el valor respaldado por Lee *et al.* (2005) en cerdos machos destetados, de 3 a 8 semanas de edad, quien señaló que es poco probable que las

diferencias en los niveles de dióxido de carbono tuviesen un efecto sobre el crecimiento de los animales debido a que los niveles, incluso en ambientes sucios, se mantienen por debajo de la concentración de los 3.000 ppm. En contraste, Donham (1991), llevando a cabo un estudio epidemiológico que relacionaba la calidad del aire con la salud del ganado en 28 granjas porcinas en el sur de Suecia, relacionó la concentración de CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, polvo y microbios en el aire con problemas de salud en el ganado estableciendo un máximo recomendado para la concentración de CO<sub>2</sub> de 1540 ppm, resaltando que los mayores problemas se concentraban en la mortalidad en las fases de nacimiento y destete. Además correlacionó las altas concentraciones de CO<sub>2</sub>, y NH<sub>3</sub> con una alta densidad del ganado, obteniendo mejores correlaciones con la densidad expresada en kg de peso vivo por m<sup>3</sup> que utilizando kg de peso vivo por m<sup>2</sup>. En ambos casos, los niveles máximos considerados son muy inferiores a las 5000 ppm propuestos por Forcada *et al.* (2009). Hobbs *et al.* (1999) midieron las emisiones desde el purín durante un período de almacenamiento anaerobio de 112 días, en los cuales la emisión se redujo linealmente y mostró una correlación negativa con el NH<sub>3</sub>, mientras que Ni (1998) constató que el CO<sub>2</sub> liberado a partir del estiércol acelera notablemente la liberación de amoníaco (NH<sub>3</sub>).

Ni *et al.* (1999c) establecieron que el peso del cerdo, la temperatura del estiércol y la tasa de ventilación tenían los más altos coeficientes de correlación con la liberación de CO<sub>2</sub>, desarrollando un modelo matemático para estimar la velocidad de liberación de CO<sub>2</sub> como una función de estas tres variables, obteniendo un R<sup>2</sup> de 0,525.

#### 2.2.4 Amoníaco

De todos los gases presentes en las explotaciones ganaderas, el amoníaco es uno de los gases que requiere un estudio más profundo debido a sus elevadas emisiones y a la influencia que los elevados niveles de concentración tienen sobre la salud y la producción de los animales, especialmente en porcino. La mayor parte del NH<sub>3</sub> es producido como resultado de la descomposición química y biológica de urea presente en la orina y del nitrógeno de la dieta en el material fecal de los mamíferos (Figura 3), por lo que, ambos, la cantidad y la composición de las heces y la orina son de interés para el estudio de las emisiones de amoníaco (Koerkamp *et al.*, 1998).



**Figura 3. Visión esquemática de los procesos y factores implicados en la liberación de amoníaco en alojamientos ganaderos. Fuente: elaboración propia a partir de Koerkamp *et al.* (1998).**

Considerables esfuerzos (principalmente en la emisión de  $\text{NH}_3$ ) se han llevado a cabo para (1) comprender los mecanismos de emisión (Aarnik *et al.*, 1995; Hinz y Linke, 1998; Seedorf y Hartung, 1999; Duchaine *et al.*, 2000; Ni *et al.*, 2000; Jacobson *et al.*, 2006; Pedersen and Ravn, 2008; Bluteau *et al.*, 2009; Ni *et al.*, 2009; Kaasik y Maasikmets, 2013; Van Ransbeeck *et al.*, 2013; Ni *et al.*, 2017), (2) resolver problemas asociados con la precisión de la medición (Koerkamp *et al.*, 1998; Phillips *et al.*, 1998; Demmers *et al.*, 1999; Banhazi *et al.*, 2008a; Banhazi *et al.*, 2008c; Cortus *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2008; Costa y Guarino, 2009; Hafner *et al.*, 2013; Ogink, 2013) y (3) para reducir las emisiones (Aarnink *et al.*, 1996; Andersson, 1996; Ni *et al.*, 1999b; Jeppsson, 2002; Philippe *et al.*, 2007; Banhazi *et al.*, 2008b; Banhazi *et al.*, 2008d; Banhazi *et al.*, 2008a; Blanes *et al.*, 2008; Van Dooren y Mosquera (2010); Saha *et al.*, 2010; Philippe *et al.*, 2011; Pereira *et al.*, 2012; Takai *et al.*, 2013; Calvet *et al.*, 2017). Claramente, se necesitan mejores mediciones de la emisión de amoníaco para permitir una mayor precisión en los inventarios de sus emisiones (Demmers *et al.*, 1999), ya que los conocimientos y técnicas de medición actuales sólo pueden proporcionar estimaciones razonables de las emisiones de las instalaciones ganaderas (Takai *et al.*, 2013). Sin embargo su detección es compleja, cara y presenta múltiples problemas, y más particularmente la detección de amoníaco en continuo ya que precisa de equipos

extremadamente caros (Banhazi *et al.*, 2008a) y con elevados costes de mantenimiento. Existen diversos tipos de sensores, entre los que destacan los semiconductores, los infrarrojos fotoacústicos (Blanes-Vidal *et al.*, 2008; Mosquera *et al.*, 2010; Calvet *et al.*, 2011) y los electroquímicos. Zhang *et al.* (2013) establecen que los sensores de gases semiconductores, ampliamente utilizados en la detección de gases en instalaciones ganaderas como el  $\text{NH}_3$ , representan una buena alternativa para la medición por su alta selectividad de gas y fácil uso a bajo coste. Sin embargo las escalas de los sensores comerciales en este tipo de sensores están muy por encima de los valores recomendados en granja. En comparación con los sensores de gases semiconductores y los sensores infrarrojos o fotoacústicos, los sensores electroquímicos presentan precios baratos y buena selectividad de gas lo cual simplifica la detección de un solo gas, aunque su precisión es menor. Por su pequeño tamaño y tiempo de respuesta rápido, los sensores electroquímicos se utilizan a menudo en la monitorización en tiempo real de los gases en instalaciones ganaderas (Zhang *et al.*, 2013). Sin embargo, la vida del sensor es limitada, se saturan con facilidad y requieren mantenimientos prácticamente continuos con una calibración como mínimo cada 6 meses. Además, el sensor pierde sensibilidad con mediciones prolongadas y los errores en la medición se incrementan cuando se aproximan al límite de detección (Phillips *et al.*, 2001). El efecto de la colocación del sensor sobre la exactitud de medición también se ve influenciada por el momento y la duración de la medición, debido a la variación de nivel de actividad de los animales en el tiempo y en diferentes etapas de la vida (Takai *et al.*, 2013). Sin embargo, podrían haber sido subestimadas concentraciones de  $\text{NH}_3$  a niveles bajos, ya que, generalmente, los sensores electroquímicos son impredecibles en la medición a estos niveles de concentración (Hoy, 1995). La duración y la precisión del sensor pueden mejorarse mediante la instalación de equipos de filtrado de aire y/o su propulsión a caudal constante hacia el sensor al evitar el contacto directo con el aire del alojamiento con elevadas concentraciones de polvo y humedad. Sin embargo, esto incidiría en un incremento del coste de la instalación y mantenimiento de los equipos auxiliares requeridos. Para evitar errores de medición causados por la saturación del sensor electroquímico por la exposición continua, Liang *et al.* (2005) utilizaron ciclos de medición de 24 minutos de purga con aire exterior y 6 minutos de muestreo, con la consecuente pérdida de información en la evolución de la concentración del gas.

#### 2.2.4.1 Concentraciones de NH<sub>3</sub> recomendadas y obtenidas por otros autores

En cuanto al nivel máximo de amoníaco tolerable existen diferentes recomendaciones. Mientras el CIGR (2002) recomienda una concentración máxima de 20 ppm, Bottcher *et al.* (2001) son más conservadores considerando adecuados niveles menores de 15 ppm. Así mismo recomiendan tomar precaución a niveles entre 15 y 25 ppm y por encima de 25 ppm son considerados peligrosos. Mucho más estrictos son los límites de exposición seguros que proponen Cargill *et al.* (2002) y Donham (2002), 10 y 11 ppm respectivamente. Los valores obtenidos por otros autores (Tabla 1) para granjas de cebo porcino convencionales en diferentes países se encuentran en muchos casos por encima de los valores recomendados.



**Tabla 1. Valores medios de NH<sub>3</sub> obtenidos por otros autores para granjas convencionales de cerdos de engorde con ventilación mecánica y suelo emparillado.**

Referencia	País	Sensor utilizado	Tipología de la medición	NH <sub>3</sub> interior (ppm)
Jacobson <i>et al.</i> (2006)	EE.UU	Estimación indirecta, a través de un detector de NO <sub>x</sub> quimioluminescente	Medición continua	<b>20,4</b>
Aarnik <i>et al.</i> (1995)	Países Bajos	Estimación indirecta, a través de un detector de NO <sub>x</sub> quimioluminescente	Medición continua	<b>6,6-16,1</b>
Demmers <i>et al.</i> (1999)	Reino Unido	Estimación indirecta, a través de un detector de NO <sub>x</sub> quimioluminescente	Medición continua	<b>15,8-39,5</b>
Seedorf y Hartung (1999)	Alemania	Estimación indirecta, a través de un detector de NO <sub>x</sub> quimioluminescente	Medición continua	<b>15,9</b>
Hinz y Linke (1998)	Alemania	Analizador multigas fotoacústico	11-13 h/día	<b>10-35</b>
Kim <i>et al.</i> (2008)	Korea del Sur	Cromatografía iónica.	Muestras de 15-30 min cada 1 h entre las 9 am y 5 pm.	<b>12,1</b>
Koerkamp <i>et al.</i> (1998)	Reino Unido	Estimación indirecta, a través de un detector de NO <sub>x</sub> quimioluminescente	Medición continua	<b>12,1</b>
	Países Bajos			<b>18,2</b>
	Dinamarca			<b>14,9</b>
Ngwabie <i>et al.</i> (2011)	Alemania	Analizador multi-gas fotoacústico	Medición continua	<b>14,3</b>
	Suecia			<b>3,9-5,4</b>

Se ha demostrado que cerdos criados en ambientes limpios con mejor calidad de aire, con bajos niveles de amoníaco, crecen más rápido que lechones que viven en granjas convencionales con alojamientos con calidad del aire no óptima (Banhazi *et al.*, 2008a). De hecho Drummond *et al.* (1980) obtuvieron reducciones en el crecimiento de los lechones del 0%, 12%, 30%, y 29%, expuestos a concentraciones de NH<sub>3</sub> de 0, 50, 100, y 150 ppm respectivamente, que corroboran los resultados obtenidos por Stombaugh *et al.* (1969) que observaron que concentraciones por encima de 100 ppm causan una disminución en el consumo de alimento y en la ganancia diaria de peso. Drummond *et al.* (1980) también encontraron que concentraciones superiores a 50 ppm provocaban el letargo de los cerdos y un excesivo lagrimeo, al igual que Curtis *et al.* (1977) que observaron que concentraciones comprendidas entre 50 y 75 ppm reducen la capacidad de los cerdos para limpiar las bacterias de sus pulmones, corroborado por Kim *et al.* (2007). Por otro lado, se trata de un gas irritante (Drummond *et al.*, 1980;

Portejoie *et al.*, 2002) que resulta en efectos adversos sobre la producción, la salud y el bienestar (Banhazi *et al.*, 2008a). Los signos clínicos incluyen tos, estornudos, salivación excesiva, secreciones lacrimales, pérdida de apetito y el comportamiento letárgico (Donham., 2000; Kim *et al.*, 2008). Altas concentraciones de  $\text{NH}_3$  pueden producir ulceración en ojos e irritación en el tracto respiratorio de los cerdos (Donham *et al.*, 1986). Jones *et al.* (1996) informó que el nivel de crecimiento estaba decreciendo junto con el consumo de alimento cuando los cerdos estaban expuestos a concentraciones de amoníaco de 10 ppm. Banhazi y Cargill (1998) obtuvieron una tasa de mejora de crecimiento del 8 % asociado con una reducción del 17 % en el recuento de bacterias, una reducción del 42 % en partículas inhalables y una reducción del 76 % en la concentración de  $\text{NH}_3$ . Asimismo, Lee *et al.* (2005) observaron que los cerdos crecieron más rápido y consumieron más alimento en ambiente limpio (concentración de amoníaco de  $6,0 \pm 0,5$  ppm) en comparación con los cerdos en un ambiente sucio (concentración de amoníaco de  $13 \pm 0,7$  ppm). Cargill y Skirrow (1997) han recomendado que el máximo nivel de amoníaco en porquerizas debe ser de 7 ppm. La mayoría de las investigaciones de campo para cuantificar las concentraciones y las emisiones de amoníaco en alojamientos porcinos, hasta la fecha, se ha realizado principalmente en los EE.UU. y la UE. De acuerdo con estos informes, la concentración media de amoníaco era aproximadamente de 15 ppm (Kim *et al.*, 2008). Por su parte, Koerkamp *et al.* (1998) midieron concentraciones de amoníaco en alojamientos para madres, cerdos destetados y cebo entre 5 y 18 ppm, correspondiendo los valores más altos a los alojamientos de cebo.

#### 2.2.4.2 Factores que influyen en la concentración y emisión de $\text{NH}_3$

La concentración de  $\text{NH}_3$  al igual que las otras variables ambientales que caracterizan el interior de los alojamientos se ven afectadas por diversos factores como el diseño y las características técnicas de los alojamientos y sus instalaciones (Zhang *et al.*, 2005), la cabaña ganadera, el estado de desarrollo de los animales (Kim *et al.*, 2007; Ni *et al.*, 1999a), el tipo de alimentación y su forma de distribución (Robertson *et al.*, 2002) y el manejo de los residuos producidos (Ni *et al.*, 1999b).

Varios estudios han demostrado que la reducción de los niveles de proteína en la dieta tiene un efecto fuerte en la emisión de  $\text{NH}_3$  (Zervas y Zijlstra, 2002; Le *et al.*,

2008). Concretamente, Montalvo *et al.* (2013) comprobaron que una reducción del contenido de proteína de 3%, provoca una reducción de las emisiones de  $\text{NH}_3$  en un 61%. Sin embargo, Hernandez *et al.* (2011), encontraron poco efecto del nivel de proteína en la dieta sobre las emisiones de amoníaco en animales de cebo. Philippe *et al.* (2007), señalaron que cualquiera que sea el tipo de suelo, las emisiones en engorde aumentan, desde el principio hasta el final del período, aproximadamente 5 veces. Ogink y Koerkamp (2001) indicaron que un cambio en el tipo de pienso combinado con el alto contenido de proteínas y energía del propio alimento dificulta la digestión y consecuentemente afecta a la emisión de  $\text{NH}_3$ .

Rom y Dahl (1996) comprobaron que las emisiones de  $\text{NH}_3$ , en locales, tanto total como parcialmente emparrillados, se incrementan con la edad del animal, aumentando, aproximadamente, de 4 a 15  $\text{gd}^{-1}$  por cerdo durante el período de engorde.

El tipo de suelo de suelo también es un factor a tener en cuenta. En comparación con un sistema de suelo totalmente emparrillado, suelos parcialmente emparrillados producen niveles más bajos de  $\text{NH}_3$  (Koerkamp *et al.*, 1998; Sun *et al.*, 2008; Ye *et al.*, 2009). Por ejemplo, en los experimentos de Sun *et al.* (2008), con cerdos de engorde, los factores de emisión de  $\text{NH}_3$  se reducen en aproximadamente un 40% al reemplazar suelos totalmente emparrillados por suelos parcialmente emparrillados (37% de la superficie). Por otra parte, el aumento del tamaño de la abertura facilita el drenaje y en consecuencia limita la producción de  $\text{NH}_3$ . En este sentido, y en condiciones de laboratorio, Svennerstedt (1999) comprobó que la ampliación del ancho de apertura del enrejado, desde 2 a 30 mm, disminuye la emisión en más del 50%. Kim *et al.* (2007) encontraron que generalmente las concentraciones y emisiones de  $\text{NH}_3$  fueron mayores en granjas de ganado porcino gestionadas con un sistema de fosa de purín con parrillas y ventilación mecánica que en los diferentes tipos de estabulaciones porcinas mientras que las partículas fueron más altas en las instalaciones con ventilación natural con sistema de cama de arena. En cuanto al material del suelo, emparrillados de hierro fundido o plástico pueden reducir la producción de  $\text{NH}_3$  en un 10-40% (Aarnink *et al.*, 1997; Timmerman *et al.*, 2003. Pedersen y Ravn, 2008), frente a los suelos de hormigón.

Sin embargo, la instalación de estos materiales no siempre es adecuada para la salud y el bienestar por distintas razones: los emparrillados de plástico no son apropiados

para cerdos pesados, mientras que los metálicos pueden causar lesiones en la piel, las extremidades y los pies con consecuencias adversas sobre el rendimiento y el bienestar animal (Lewis *et al.*, 2005). Además, el coste de estos materiales es significativamente mayor que el del hormigón (Philippe *et al.*, 2011). En granjas ecológicas de cebo de porcino, el sistema de limpieza de purín bisemanal manual proporcionó mayor emisión de NH<sub>3</sub>, mientras que el empleo de sistemas de limpieza con rascador y con emparrillado dieron lugar a emisiones menores (Ivanova-Peneva *et al.*, 2008). Philippe *et al.* (2007) encontró que las emisiones de NH<sub>3</sub> son un 14% mayores en alojamientos con cama de paja frente a los alojamientos que tienen suelo emparrillado, lo cual no concuerda con lo expuesto por Kim *et al.* (2007). Además, utilizar ensilado de maíz como material de cama frente a paja de cereal produce un incremento de las emisiones de NH<sub>3</sub>, pasando de 1,68 a 2,22 g h<sup>-1</sup> hpu<sup>-1</sup> (Blanes Vidal *et al.*, 2008).

Además la concentración de NH<sub>3</sub> está influenciada por las otras variables ambientales dentro del alojamiento como el flujo de ventilación, la actividad animal, la concentración de CO<sub>2</sub>, la humedad relativa, la temperatura y la estación del año. Además muchos autores han realizado estudios para relacionar de forma fiable la concentración de NH<sub>3</sub> en el interior de los alojamientos con estas variables, de más fácil medición, con el fin de utilizarlas para el control de sus instalaciones.

Los flujos de ventilación elevados provocan, en general, altas velocidades del aire en el interior del alojamiento y en consecuencia mayores emisiones gaseosas. Mosquera y Ogink (2011) observaron como la tasa de ventilación acompañada de la edad del animal afectan fuertemente la emisión de NH<sub>3</sub>.

Blanes *et al.* (2008), indican que uno de los tres parámetros que explican la mayor parte de la variabilidad de las emisiones de NH<sub>3</sub> es el flujo de ventilación. Kavouelis (2003) obtuvo una relación directa entre la concentración de amoníaco y la velocidad interior para alojamientos con cerdas y sus crías. En todos los tipos de alojamientos, la calidad del aire en el interior del edificio está afectada por el sistema de ventilación, con menores concentraciones de NH<sub>3</sub> asociadas con extracciones desde el suelo o la fosa (Massabie *et al.*, 1999; Saha *et al.*, 2010). De hecho, la ubicación de las salidas de aire cerca de la principal fuente de contaminantes mejora la calidad del aire (Philippe *et al.*, 2011). Diversos autores (Aarnink *et al.*, 1993; Lemay *et al.*, 2002; Blanes *et al.*, 2008) indican una alta correlación entre la actividad animal y la emisión de amoníaco que

puede ser debida, en parte, a la relación entre la actividad animal y el flujo de ventilación, y en parte al comportamiento urinario de los cerdos, el cual también muestra una variación diaria, siendo mayor en el día que en la noche. En este sentido, algunos autores (Aarnink *et al.*, 1996; Osada *et al.*, 1998; Jeppsson, 2002; Sousa y Pedersen, 2004) han señalado que el enlace entre la actividad animal y las emisiones de amoníaco podría ser la variación de las actividades excretoras de los cerdos. Aarnink *et al.* (1995) midieron emisiones un 7% más altas durante el día que durante la noche. Por su parte, Guarino *et al.* (2003) mostraron que la emisión diaria de amoníaco varía con un pequeño pico en la mañana y un máximo por la tarde. Haeussermann *et al.* (2003) también mostraron que la actividad de los animales es más alta durante el día. Jeppsson (2002) midió variaciones diarias en la emisión de  $\text{NH}_3$  con valores comprendidos entre el 6 y el 247% de la media diaria.

Existe una alta correlación entre las variaciones diurnas en las emisiones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  (Jeppsson, 2002) estando ambas correlacionadas también con la temperatura y la actividad animal. Philippe *et al.* (2007), obtuvieron coeficientes de correlación entre las emisiones de  $\text{CO}_2$  y las emisiones de  $\text{NH}_3$  para suelos con emparrillado y con cama de paja. Duchaine *et al.* (2000) también informaron de una alta correlación entre los niveles de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  para alojamientos porcinos. Para alojamientos de gallinas ponedoras Ni *et al.* (2017) observaron que las variaciones de las emisiones de  $\text{NH}_3$  pueden ser explicadas por la variación en la emisión de  $\text{CO}_2$ . Esta relación puede justificarse ya que el  $\text{CO}_2$  liberado a partir del estiércol acelera notablemente la liberación de amoníaco en los alojamientos porcinos Ni (1988).

Las concentraciones altas de humedad en el aire favorecen la liberación de  $\text{NH}_3$  del estiércol en alojamientos de gallinas ponedoras (Ni *et al.*, 2017). Estos autores observaron que durante el invierno la concentración de  $\text{NH}_3$  es mayor cuando las tasas de ventilación son menores y el estiércol se mantiene más húmedo. Weaver y Meijerhof (1991) y Liu *et al.* (2007) en alojamientos para pollos, también detectaron que cuando la humedad relativa es alta el estiércol se mantiene más húmedo y se acelera la liberación de  $\text{NH}_3$ . Jeppsson 2002 también observó que las variaciones diurnas de humedad relativa y concentración de  $\text{NH}_3$  están correlacionadas. Sin embargo Choi *et al.* (2005) encontraron una correlación inversa entre la emisión de  $\text{NH}_3$  y la humedad relativa en alojamientos porcinos.

La temperatura ambiental influye en las emisiones de  $\text{NH}_3$  (Ni *et al.*, 1999b) directamente al afectar al coeficiente de transferencia de masa (Nye, 1986) e indirectamente al afectar a la temperatura de la superficie del estiércol (Voorburg y Kroodsma, 1992), a la actividad de la ureasa (Schulte, 1997), al equilibrio entre amoníaco y amonio (Srinath y Loehr, 1974), a la fracción gaseosa de amoníaco (Hashimoto y Ludington, 1971) y al comportamiento de los animales. De hecho, el grado de ensuciamiento del suelo, en gran medida, depende de la temperatura en el interior (Huynh *et al.*, 2005). Asimismo, la temperatura del aire de entrada en el alojamiento incrementa exponencialmente la liberación de  $\text{NH}_3$  (Andersson, 1996). Otros trabajos (Moller *et al.*, 2004; Cortus *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2012) han mostrado reducciones en las emisiones de amoníaco a temperaturas ambiente más bajas, probablemente como consecuencia de la mayor lentitud de las reacciones microbianas y enzimáticas (Beccaccia *et al.*, 2015). Jeppsson (2002) observó que la variación diaria de la temperatura del aire de entrada al alojamiento guarda una relación exponencial con la emisión de  $\text{NH}_3$  durante las mañanas.

Por su parte, Oldenburg (1989) reportó una variación diurna de 50 a 150% en los alojamientos para cerdos de engorde. Aarnink *et al.* (1995) informaron de una reducción en la emisión durante la noche del 7%. Rom y Dahl (1996) informaron de una variación diaria de la emisión, pasando del 3% al principio del período de engorde al 18% al final del mismo. Estas variaciones tan elevadas en las emisiones de  $\text{NH}_3$  podrían explicarse por la gran variación en la temperatura del aire interior entre el día y la noche. Koerkamp *et al.* (1998) establecieron que el efecto de la temperatura media diaria exterior en las concentraciones de  $\text{NH}_3$ , varía entre el -8 y el 0% por grado K.

Barrasa *et al.* (2012) observaron una correlación lineal positiva entre las concentraciones diarias de  $\text{NH}_3$  y el aumento de la temperatura en nueve de 12 granjas porcinas españolas en verano. Un estudio realizado en los EE.UU. también demostró una variación diurna marcada en las concentraciones, tanto de  $\text{NH}_3$  como de partículas del aire, debido a las fluctuaciones de la temperatura (O'Shaughnessy *et al.*, 2002). Sousa y Pedersen (2004) observaron que las emisiones de  $\text{NH}_3$  dependen de la temperatura interior. Pereira *et al.* (2012) demostró que las emisiones más altas de  $\text{NH}_3$  coinciden con las temperaturas más altas en alojamientos de vacuno lechero.

Kaasik y Maasikments (2013) observaron que la tasa de emisión de  $\text{NH}_3$  está directamente relacionada con la temperatura. Queiroz *et al.* (2005) tuvo como objetivo desarrollar un algoritmo para calcular el límite de los lechones a la exposición de amoníaco asociado a la temperatura ambiente en el entorno del alojamiento. Los resultados mostraron una correlación negativa entre la concentración de amoníaco y los valores de confort térmico de lechones, alcanzando apenas el 60% de confort térmico cuando los valores de amoníaco alcanzaron 10 ppm.

En cuanto a la estacionalidad, se observó una disminución significativa en las concentraciones de bacterias en el aire,  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$  durante el verano cuando se compararon con los niveles de invierno en alojamientos de cría de ganado porcino en Canadá (Duchaine *et al.*, 2000). Estudios realizados por Banhazi *et al.* (2008b) observaron, en granjas porcinas, el efecto interactivo entre la estación y la gestión de los animales sobre la concentración de  $\text{NH}_3$ . Esto confirmó los resultados de estudios previos (Cargill y Banhazi, 1998) que demuestran los efectos positivos de la gestión allin/allout (AIAO) sobre la higiene mantenida en instalaciones de cría de cerdos y por lo tanto en la calidad del aire. En las granjas con sistema AIAO el efecto de la estación sobre el interior de la instalación es mínimo y la concentración de amoníaco estable.

### 2.2.5 Actividad Animal

La producción de  $\text{CO}_2$ , la humedad y el calor producido por los animales están relacionados con la actividad de los animales, la cual varía diariamente (Van Ouwerkerk y Pedersen, 1994; Pedersen y Rom, 1998; Ni *et al.*, 1999a; Jeppsson, 2002; Chwalibog *et al.*, 2004; Sousa y Pedersen, 2004).

La actividad animal muestra ciclos diarios, en función de las distintas acciones que llevan a cabo (Blanes y Pedersen, 2005). Para cuantificar la actividad animal existen varias alternativas tales como su evaluación mediante detectores de infrarrojos pasivos (Pedersen y Pedersen, 1995), mediante aproximaciones con modelos de variación diaria, sinusoidales, de uno o dos máximos (Pedersen y Sällvik, 2002) o mediante el análisis de vídeo automatizado (Nasirahmadie *et al.*, 2015; Ott *et al.*, 2014), aunque este método se utiliza exclusivamente para fines de investigación y requiere un mayor desarrollo para granjas comerciales de ganado.

Blanes y Pedersen (2005), expresaron la actividad animal en términos de actividad relativa, es decir, en relación con la actividad promedio del período de tiempo medido. Comprobaron que la actividad animal es baja y relativamente constante entre las 20:00 y la 03:00 h, con una actividad aproximadamente un 25% inferior a la media diaria. Por otra parte, la actividad animal muestra dos máximos diarios, probablemente relacionados con el suministro de alimento. Estos dos máximos están relativamente próximos uno del otro, lo cual puede estar asociado con la falta de luz del día en el período de invierno. Obtuvieron estimaciones de la variación diaria de la actividad animal con valores de  $R^2$  de 0,88 para el modelo senoidal simple y de 0,95 para el modelo senoidal doble.

Ortega (2015), en alojamientos porcinos de transición, observó también que la actividad de los animales es mínima durante la noche (entre las 22:00 y las 7:00 h). Además observó que en los ciclos de producción con menor actividad durante las horas nocturnas, se alcanzaron mayores ganancias de peso diarias (310-350 g día<sup>-1</sup>), comparados con los ciclos con mayor actividad nocturna, con ganancias de peso diarias entre 250-290 g día<sup>-1</sup>.

Por su parte, Pedersen y Rom (1998) midieron la actividad animal con cerdos en crecimiento en suelo parcialmente emparrillado obteniendo un promedio en el ratio noche/día de 0,68. De Sousa y Pedersen (2004) aproximaron la variación diurna de la actividad de los animales a un modelo senoidal con una correlación de  $R^2 = 0,75$ . Besteiro *et al.* (2017) obtuvieron dos modelos para determinar el nivel de actividad en lechones destetados durante un ciclo completo de 6 a 20 kg de masa corporal: un modelo con un único pico de actividad durante las primeras semanas del ciclo (hasta 20-21 días después del destete) y un segundo modelo con dos picos de actividad desde el día 22 hasta el final del ciclo, además establecieron que la edad y la masa de los animales son esenciales para definir los patrones de comportamiento.

## **2.2.6 Control de las instalaciones**

El objetivo principal de un sistema de control ambiental en alojamientos para el ganado es mantener diferentes variables, como la temperatura, la humedad y las concentraciones de contaminantes, a niveles óptimos para animales y seres humanos

mediante la entrega de flujo de aire exterior y de calor adicional cuando sea necesario (Soldatos *et al.*, 2005). La base del confort térmico, del nivel de contaminantes en el aire y de la eficiencia de ventilación es el flujo de aire interno, que puede ser controlado por el sistema de ventilación (Seo *et al.*, 2012; Weeks, 2008). La distribución de las explotaciones de ganado porcino está caracterizada por la existencia de alojamientos de distintas características para las distintas fases del proceso productivo, algunos de los cuales (partos y destete) requieren un elevado número de dependencias, y por tanto, un elevado número de elementos de medición y control en una misma explotación.

Este trabajo se centra en las instalaciones de transición, donde los lechones están desde los 6 hasta los 20 kg de p.v. durante un período aproximado de 6 semanas. Ésta es una fase muy sensible para el lechón, especialmente después del destete, el cual va a sufrir un importante estrés como consecuencia de la separación de la madre, la mezcla con animales de otras camadas (Gonyou, 2001) y los cambios en el ambiente y la dieta (Le Dividich and Herpin, 1994). Los cambios en la dieta y en la ingesta de alimento van a estar influenciados por una gran cantidad de factores tales como el estado de salud, la edad de destete, el nivel y el equilibrio de nutrientes en la dieta, la palatabilidad de los ingredientes, las formas de presentación de la dieta o la calidad y el suministro de agua (Dong y Pluske, 2007). De hecho, desde un punto de vista nutricional, la transición de la alimentación en paridera a la ingesta de alimentos sólidos se asocia con un período crítico de subalimentación en el que el cerdo aprende a comer la comida seca (Le Dividich and Herpin, 1994). Todo ello, junto con el hecho de que multipliquen por 3 su peso en seis semanas hace que los requerimientos climáticos durante esta fase sufran también variaciones importantes. Esto requiere la adaptación de los parámetros de control de los equipos de climatización a las necesidades del lechón a medida que aumenta su peso.

Dentro del interior de alojamientos para la fase de destete, el clima en la zona ocupada por los animales (AOZ) es la zona de mayor preocupación (Randall, 1980; Hoff, 1995; Zhang *et al.*, 2001; Van Wagenberg y Smolders, 2003). Dentro de la sala pueden producirse diferencias significativas de temperatura entre la posición del sensor para el control climático y la AOZ (Randall, 1980; Van 't Klooster, 1994; Van Wagenberg *et al.*, 2004). En este sentido, van Wagenberg *et al.* (2005) comprobaron que la temperatura de la AOZ fue menor durante el primer período de un lote de

animales y presentaba más fluctuaciones que la temperatura de la sala. Además, la baja frecuencia de encendido y apagado del sistema de calefacción dio lugar a mayores fluctuaciones en la temperatura de la AOZ que en la temperatura ambiente, por lo que el uso de la temperatura de la AOZ para controlar el clima de la sala podía ser más ventajoso que el sistema convencional, donde el climatizador se basa habitualmente en la temperatura ambiente (Van Wagenberg *et al.*, 2005).

En los alojamientos de gallinas, con ventilación mecánica y bajo condiciones bien controladas, las tasas de ventilación pueden determinarse utilizando métodos directos con una precisión mayor del 10% (Gates *et al.*, 2004; Calvet *et al.*, 2010). Sin embargo, en edificios con ventilación natural y en edificios con un gran número de ventiladores, los métodos indirectos son necesarios para determinar las tasas de ventilación, ya que los métodos de medición directa o son poco prácticos o no es posible.

Entre los métodos indirectos, los balances de CO<sub>2</sub> han sido ampliamente utilizados en el pasado (Pedersen *et al.*, 1998). Las estrategias de control mediante el cálculo de la tasa de ventilación basado en la concentración de dióxido de carbono pueden ser bastante buenas. Por lo tanto, el aumento de la concentración de dióxido de carbono durante el día no resultará necesariamente en una concentración más alta, pero sí en un incremento de la tasa de ventilación. El conocimiento de los factores de diseño y de gestión que afectan a las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las instalaciones porcinas, podría ser utilizado para mejorar la eficacia de los sistemas de ventilación y por lo tanto mejorar el ambiente interno en explotaciones porcinas (Banhazi *et al.*, 2008a).

Es evidente que mejorar la calidad del aire en las granjas puede producir importantes beneficios, incluyendo la reducción del impacto ambiental, mejorando la eficiencia en la producción y un mejor ambiente de trabajo para los empleados. (Banhazi *et al.*, 2008a). Seo *et al.* (2012) emplearon modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) incorporando los animales a las simulaciones, lo que supuso la obtención de unos modelos mucho más eficaces al proporcionar un flujo de aire más realista y tener en cuenta el aporte de la emisión del calor producido por los animales. Al comparar el CFD obtenido con los datos de campo reales se observó un error de -0,68°C en la temperatura media interior. Además este modelo se utilizó para mejorar las condiciones ambientales existentes en el alojamiento. Así, cambiando el diseño de la

ventilación, sellando las entradas y reduciendo el tamaño del área de la entrada de aire se consiguió mejorar un 24% la uniformidad térmica de la sala.

La herramienta más eficiente para asegurar una producción óptima en alojamientos ganaderos es un sistema de control ambiental bien diseñado (Parsons *et al.*, 2007; Garcimartin *et al.*, 2007). Los sistemas de control deben mejorar para cumplir con las regulaciones cada vez más estrictas sobre las técnicas en las granjas destinadas a disminuir el impacto ambiental de la producción ganadera (Van Ransbeeck *et al.*, 2012) o proporcionar un mayor nivel de bienestar de los animales (Hamon *et al.*, 2012), manteniendo al mismo tiempo la productividad. Un sistema de control ambiental bien diseñado debería utilizar información relevante a tiempo real para mejorar la productividad, sanidad y bienestar animal (Cornou & Kristensen, 2013) ya que el éxito de la climatización, radica en gran medida en su sistema de control.

La mayoría del equipo técnico para el control ambiental en alojamientos de animales sólo está referido a los sistemas de ventilación y calefacción (Chao *et al.*, 2000; Gates *et al.*, 2001; van Wagenberg *et al.*, 2005), aunque en algunos casos se utilizan equipos para la limpieza del aire, refrigeración y humidificación. Los diseños más eficaces utilizan los conceptos de control automático de retroalimentación basado en la temperatura del aire interior, medida en una posición dentro del volumen del edificio (Timmons *et al.*, 1995; Seedorf *et al.*, 1998b) y en las unidades de producción mejor equipadas, la tasa de ventilación (Berckmans y Goedseels, 1986, Pedersen *et al.*, 1998).

Sin embargo, el control de estas instalaciones, presenta numerosos problemas. Por una parte, el control de las instalaciones convencional y más extendido en explotaciones de ganado porcino es la estrategia TC (control de la temperatura) con controladores separados para ventilación y calefacción. Las instalaciones de calefacción y ventilación interaccionan entre sí, de modo que parte del aporte de calor de la calefacción se extrae mediante el sistema de ventilación para la eliminación de gases nocivos. Asimismo, el incremento de temperatura que produce el aporte de calor de la calefacción y los animales, junto a la respiración de estos últimos, da lugar a un incremento de humedad que es necesario extraer mediante el sistema de ventilación. A ello hay que agregar las concentraciones de gases nocivos como el CO<sub>2</sub> o el NH<sub>3</sub> que se generan en el interior del alojamiento y que la ventilación se encarga de extraer. Como se deduce, la

coordinación de instalaciones de calefacción y ventilación es crucial tanto para la adecuación a los requerimientos como para la minimización de los costes originados.

Sin embargo este tipo de control omite variables tan importantes como la humedad o las concentraciones de  $\text{NH}_3$  o  $\text{CO}_2$ , actuando indirectamente sobre ellas, pero desconociendo su valor. Por lo tanto, el ganadero puede ser incapaz de satisfacer las exigencias ambientales de los animales o de cumplir con las exigencias, cada vez más estrictas, sobre las técnicas de producción con el objetivo de disminuir el impacto ambiental de la producción pecuaria o proporcionar un mayor nivel de bienestar de los animales (Aerts *et al.*, 2003, Soldatos *et al.*, 2005). Se han realizado esfuerzos en desarrollar sistemas de control que incorporen la humedad relativa. Guo *et al.* (2001) crearon un sistema de control temperatura-humedad (THC). Este sistema fue evaluado en una sala de cerdos en cebo durante 8 semanas en invierno y a inicios de la primavera; comparando una sala con un sistema de control convencional TC y una sala con sistema de control THC, la concentración de  $\text{NH}_3$  y polvo no se vieron afectadas, pero la concentración de  $\text{CO}_2$  fue superior en la sala con THC, indicando una tasa de ventilación menor. Lambert *et al.* (2001) desarrollaron un modelo computacional de estado continuo para evaluar los sistemas de control TC y THC para alojamientos porcinos durante la estación fría. Tras la realización de las simulaciones obtuvieron que la estrategia óptima sería un sistema THC, un controlador proporcional con una humedad relativa de consigna del 75% y un ancho de banda del 5%. Soldatos *et al.* (2005) generaron un control de retroalimentación robusto no lineal en conjunción con un sistema de control de prealimentación, para garantizar arbitrariamente pequeñas desviaciones en los valores deseados de temperatura y humedad, en alojamientos porcinos. Daskalow *et al.* (2006) diseñaron un sistema de control no lineal basado en el método de compensación retroalimentación/prealimentación de las perturbaciones externas medidas. Este sistema dio como resultado un sistema robusto no lineal, adaptativo e integral para el control simultáneo de la temperatura y la humedad en alojamientos ganaderos para invierno y verano. Los resultados de la simulación de control temperatura/humedad llevados a cabo en un alojamiento porcino, verificaron la eficacia y el buen funcionamiento del sistema propuesto.

Otras investigaciones conducen a la aplicación de métodos más sofisticados para el diseño y control de sistemas de microclima. Sigrimis *et al.* (2000) y Gates *et al.* (2001),

indicaron que los métodos de ventilación convencionales pueden ser reemplazados por una técnica de inferencia difusa, mientras que Taylor *et al.* (2004) sugirieron que los edificios con ventilación mecánica pueden ser rediseñados usando el control proporcional-integral-plus (PIP).

Como se puede observar, los prometedores resultados de estas nuevas estrategias no están del todo avalados experimentalmente, ya que la medición de nuevas variables en el control del clima resulta difícil. Por un lado, requiere un importante esfuerzo económico, ya que son necesarias la incorporación de nuevos sensores y la mejora de los controladores. Por otro, la falta de homogeneidad del ambiente interior dificulta la elección del emplazamiento adecuado para los sensores y así obtener mediciones significativas del conjunto del local y del estado del animal (van Wagenberg *et al.*, 2005).

Otra opción para la incorporación de estas variables al control sin la necesidad de su medición es el conocimiento de su evolución. La obtención de patrones de comportamiento es especialmente útil en el caso de la concentración de amoníaco. Ello se debe a la importancia de la variable tanto en la cría del lechón como desde un punto de vista ambiental y a la dificultad de medición de la misma. La determinación del patrón de variación para las variables climáticas permite la caracterización del ambiente climático dentro del interior de las granjas y puede ser implementado como parte de sistemas de control más eficientes, que permitan una mejora productiva y del bienestar animal compatible con la reducción de la emisión y consecuente mayor respeto ambiental. Esto sería posible gracias a sistemas eficaces con un mínimo consumo de recursos en la automatización, ya que la predicción matemática sustituiría la medición. Dadas las estrictas y cambiantes condiciones ambientales que requieren los cerdos destetados, el conocimiento de los patrones de comportamiento de la concentración de amoníaco en explotaciones comerciales podría ser de gran utilidad.

Dadas las condiciones ambientales estrictas y cambiantes requeridas por lechones destetados, determinar el patrón de variación para la concentración de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) se convierte en altamente beneficioso debido a la influencia sobre el crecimiento de los lechones (Drummond *et al.*, 1980; Barrasa *et al.*, 2012) y la dificultad de medir tales efectos (Takai *et al.*, 2013). Varios autores propusieron patrones senoidales diarios para las concentraciones de  $\text{NH}_3$  en granjas cunícolas (Calvet *et al.*, 2011a), y para las

emisiones de NH<sub>3</sub> en granjas avícolas (Calvet *et al.*, 2011b) y para granjas bovinas lecheras (Saha *et al.*, 2014). Sin embargo, estos hallazgos no estaban de acuerdo con los resultados reportados para cerdos de cebo en fase de acabado (Wang *et al.*, 2011).

Es necesario más estudio e investigación para desarrollar medidas que sean lo suficientemente precisas para validar modelos de simulación y obtener estimaciones de las emisiones más consistentes y precisas (Takai *et al.*, 2013).

Esta problemática en el ambiente de los alojamientos destaca aún más la importancia de la supervisión continua de los procesos de producción ganadera y el desarrollo de herramientas de toma de decisiones en tiempo real, lo que permitiría a los productores la implementación de cambios de gestión, teniendo en cuenta las posibles consecuencias económicas de tales decisiones (Banhazi *et al.*, 2007).



## Capítulo 3. Objetivos

---

Los objetivos de esta T.D. basada en el análisis de los parámetros de calidad ambiental y actividad animal de una explotación de cría de lechones de 6 a 20 kg de p.v. situada en Galicia son:

1. Estudiar la temperatura, las concentraciones de  $\text{NH}_3$  y  $\text{CO}_2$ , la humedad relativa, la velocidad del aire y la actividad animal en el interior del alojamiento, y su ajuste a los parámetros recomendados.

2. Obtener las interacciones entre las variables ambientales, con especial atención a la concentración de  $\text{NH}_3$  y su estimación a partir de otras variables de medición más fácil y bajo coste, factibles en alojamientos ganaderos.

3. Desarrollar modelos entre las distintas variables ambientales que permitan inferir unas en función de las otras de modo que, minimizando el número de sensores y manteniendo la precisión, caractericen la calidad ambiental global del alojamiento.

Para ello se persigue la caracterización ambiental de las explotaciones porcinas de destete con control convencional para un conocimiento en profundidad de sus características, permitiendo su evaluación para el establecimiento posterior de nuevas estrategias de control ambiental que permitan conseguir el máximo rendimiento con el mínimo consumo de recursos, con especial atención al bienestar animal y a la eficiencia de las explotaciones.



# **Capítulo 4.**

## **Material y métodos**

---





## Capítulo 4. Material y Métodos

### 4.1 ENSAYO EXPERIMENTAL

#### 4.1.1 Emplazamiento

El ensayo experimental se llevó a cabo en una explotación porcina de producción de lechones de 20 kg de peso vivo, con un censo ganadero autorizado de 4895 madres y 18 machos. La madre es una híbrida Landrace X Large White y el macho terminal Pietrain. Se encuentra situada en la parroquia de Vizoño, en el ayuntamiento de Abegondo, A Coruña (Figura 4 y Figura 5).



Figura 4. Localización geográfica de la granja.



Figura 5. Localización y vista aérea de la explotación porcina.

#### 4.1.2 La explotación porcina

La explotación porcina consta de un conjunto de naves en las que se van a desarrollar las distintas fases del proceso productivo así como una serie de edificaciones donde se van a alojar los servicios auxiliares del proceso. En la Figura 6 se muestra el plano general de la explotación con las distintas edificaciones.

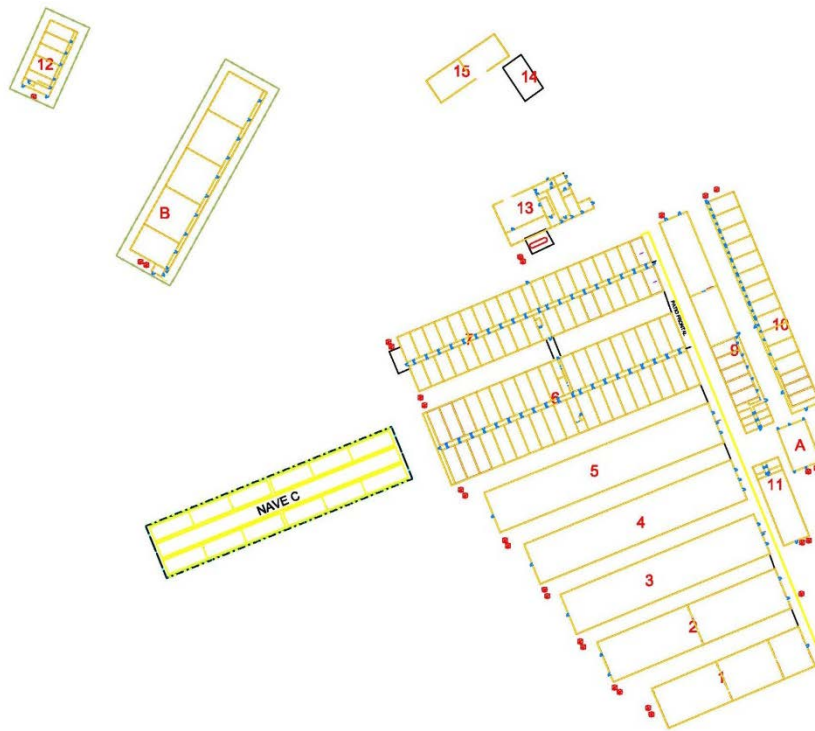


Figura 6. Planta general de la explotación.

- NAVE 1 - Lazareto y primerizas: tiene unas dimensiones exteriores de 71,49x19,30 m, lo que da una superficie construida total de 1379,76 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 4,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de 2,4-E02 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Las divisiones interiores son de ladrillo enfoscado de 10 cm de espesor.
- NAVE 2 - Gestación comprobada: tiene unas dimensiones exteriores de 86,43x19,30 m, lo que da una superficie construida total de 1668,10 m<sup>2</sup>. La

altura de coronación de la edificación es de 4,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $2,4\text{-E}02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm. En esta nave se sitúan un almacén de  $12,56 \text{ m}^2$  y los aseos y vestuarios del interior de la explotación con una superficie de  $6,72 \text{ m}^2$ .

- NAVE 3 - Gestación y control: tiene unas dimensiones exteriores de  $93,94 \times 19,30 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $1813,04 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de 4,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $2,4\text{-E}02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
- NAVE 4 - Gestación comprobada: tiene unas dimensiones exteriores de  $100,18 \times 19,30 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $1933,47 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de 4,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $2,4\text{-E}02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
- NAVE 5 - Gestación y control: tiene unas dimensiones exteriores de  $108,18 \times 19,30 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $2087,87 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de 4,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $2,4\text{-E}02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .
- NAVE 6 - Parideras: tiene unas dimensiones exteriores de  $118,64 \times 34,68 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $4114,44 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de 4,40 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón

de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de polipropileno de alto impacto y cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $0.024 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm. En esta nave se sitúan un almacén de  $26,41 \text{ m}^2$ , duchas para las madres con una superficie de  $25,82 \text{ m}^2$ , almacén de partos de  $43,65 \text{ m}^2$ , con un aseo anexo con una superficie de  $3,52 \text{ m}^2$  y una sala de calderas de  $21,80 \text{ m}^2$ .

- NAVE 7 - Destete: tiene unas dimensiones exteriores de  $118,64 \times 34,68 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $3117,86 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de  $4,20 \text{ m}$ . Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de polipropileno de alto impacto y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de conductividad térmica ( $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) de  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm. Esta nave dispone de un almacén de  $31,10 \text{ m}^2$  y de una sala de calderas de  $7,79 \text{ m}^2$ . Se trata de la nave donde se llevó a cabo el ensayo experimental de la presente Tesis Doctoral.
- NAVE 8 - Cobertizo para el separador de sólidos: tiene unas dimensiones exteriores de  $18,00 \times 19,30 \text{ m}$ , con una superficie de  $347,40 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de  $6,00 \text{ m}$ . Consta de 3 paredes exteriores de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja.
- NAVE 9 - Destete – parideras – gestación: tiene unas dimensiones exteriores de  $102,00 \times 13,50 \text{ m}$ , lo que da una superficie construida total de  $1377,00 \text{ m}^2$ . La altura de coronación de la edificación es de  $3,16 \text{ m}$ . Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de polipropileno de alto impacto y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de  $37 \text{ kg m}^{-3}$  de densidad y un coeficiente de

conductividad térmica (10 °C) de  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm.

- NAVE 10 - Destete – parideras – gestación: tiene unas dimensiones exteriores de 102,00x13,50 m, lo que da una superficie construida total de 1377,00 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 3,50 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de polipropileno de alto impacto en la zona de destete y parideras y de emparrillado de hormigón en gestación. La cubierta es de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja, aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm.
- NAVE 11 - Gestación comprobada – almacén – potro/laboratorio: tiene unas dimensiones exteriores de 37,72 x 12,28 m, lo que da una superficie construida total de 463,20 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 3,20 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm.
- NAVE 12 - Cuarentena: tiene unas dimensiones exteriores de 31,55x13,50 m, lo que da una superficie construida total de 425,92 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 3,15 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de hormigón en zonas empleadas para el ganado y de hormigón en el resto de la nave y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de  $2,4 \cdot 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm. Esta nave dispone de una sala de máquinas de 8,64 m<sup>2</sup>, de duchas y aseo para el personal de la explotación con una superficie de 7,08 m<sup>2</sup> y de un almacén de 20,64 m<sup>2</sup>.
- NAVE 13 - Oficina – vestuarios – almacén: tiene unas dimensiones exteriores de 35,00x20,00 m y una superficie anexa destinada a lavandería de 6,00x5,00, lo

que da una superficie construida total de 730,00 m<sup>2</sup>, dividida en dos plantas en la zona de comedor, duchas y vestuarios y oficinas. La altura de coronación de la edificación es de 5,45 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de hormigón en zonas empleadas para el ganado y de hormigón en el resto de la nave y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de 2,4-E02 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm.

- NAVE 14 - Garaje de maquinaria agrícola: tiene unas dimensiones exteriores de 37,10 x 12,00 m, lo que da una superficie construida total de 445,20 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 7,10 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de hormigón y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja.
- NAVE 15 - Cobertizo aparcamiento: Se trata de una estructura metálica y cubierta de chapa de zinc galvanizada con una superficie de 37,10x11,86 m, con una superficie de 440,01 m<sup>2</sup>. No dispone de cerramiento.
- NAVE A - Lechoneras: tiene unas dimensiones exteriores de 20,28 x 13,21 m, lo que da una superficie construida total de 268,00 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 4,30 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor, la solera de emparrillado de polipropileno de alto impacto y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento tipo gran onda color teja. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de 2,4-E02 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Las divisiones interiores son de bloque de hormigón de 10 cm.
- NAVE B - Recría: tiene unas dimensiones exteriores de 91,26x19,65 m, lo que da una superficie construida total de 1793,26 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la edificación es de 4,90 m. Las paredes exteriores son de bloque de hormigón de 14 cm de espesor y la cubierta de chapa ondulada de fibrocemento, tipo gran onda. La cubierta está aislada a base de espuma de poliuretano proyectado, de 37 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de conductividad térmica (10 °C) de 2,4-E02

$W m^{-1} K^{-1}$ . La solera está compuesta por emparrillado de hormigón. Los 5 módulos de los que consta están separados por cerramiento de bloque de hormigón de 10 cm. Adosada a esta nave se encuentra una edificación destinada a almacén con unas dimensiones exteriores de 3,89x5,14 m lo cual supone una superficie construida de 20,00 m<sup>2</sup>.

- NAVE C - Gestación comprobada: tiene unas dimensiones exteriores de 118,84x25,12, con una superficie construida de 2985,30 m<sup>2</sup>. La altura de coronación de la cubierta es de 5,57 m. Los cerramientos exteriores están constituidos por panel sándwich de hormigón para cerramiento de naves dotado de alma de poliestireno expandido, de un grosor total de 16 cm (4+4+4). Como material de cubrición de panel aislante integrado por placa perfil Gran onda® en la parte exterior, aislante de poliuretano inyectado en molde, incorporado a la cara interior de la placa, de 35 kg m<sup>-3</sup> de densidad y un coeficiente de transmisión térmica (10 °C) de 2,4-E02  $W m^{-1} K^{-1}$ . La solera está formada por dos tipos de emparrillado: un pavimento continuo, sin aberturas, de 1000 mm de longitud y 650 mm de anchura y, a continuación, un emparrillado de 80 mm de pisada y 18 mm de ranura.

#### 4.1.3 El proceso productivo

Esta explotación porcina tiene una capacidad autorizada en la actualidad de 4895 madres dedicadas a la producción de lechones de 20 kg de peso vivo y 18 verracos, lo que da una equivalencia de 1473,9 UGM tratándose de una explotación en ciclo abierto tal y como se muestra en la Figura 7.

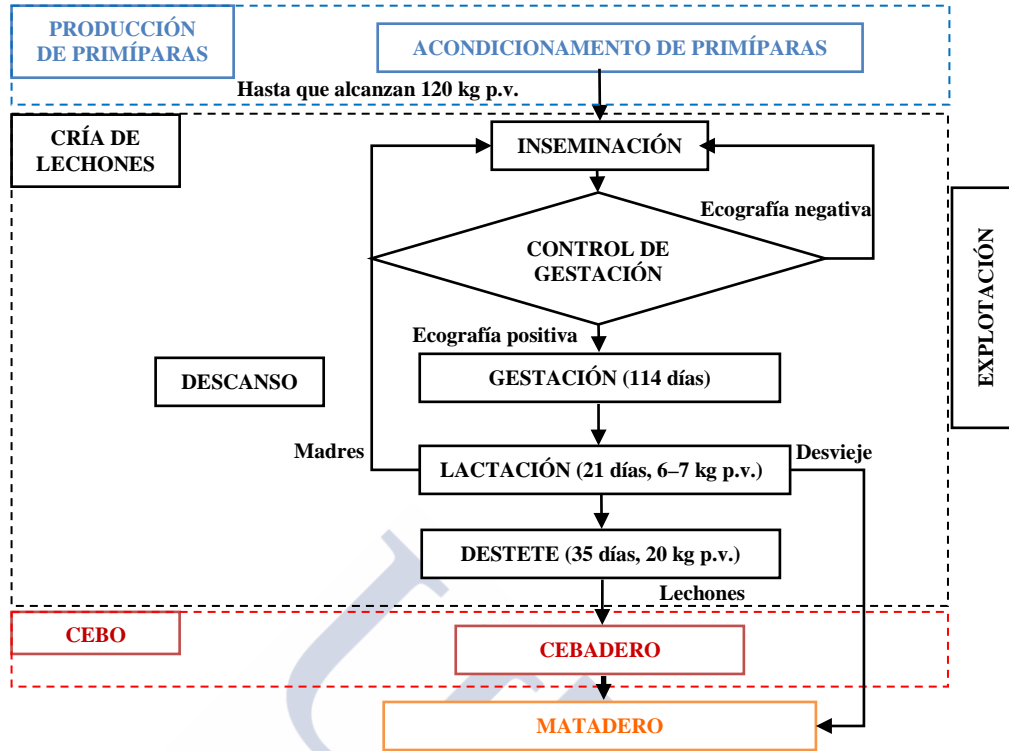


Figura 7. Esquema del proceso productivo de la explotación.

Para el cálculo de los ciclos que se lleva a cabo anualmente el parámetro de partida es la duración del período de gestación de las madres, lo cual se establece en 115 días como término medio. Teniendo en cuenta posibles retrasos de entrada en celo así como posibles fallos en la inseminación, esta explotación alcanza una media de 2,40 partos por año y madre, destetando aproximadamente 11 lechones por parto, lo que da lugar a una producción media de 129.228 lechones al año.

La explotación se encuentra dividida en secciones de trabajo, que se corresponden con las distintas dependencias de la misma ya descritas en el epígrafe 4.1.2, desde la zona de gestación a la zona de destete.

En este apartado se describen las distintas actividades del proceso en base a las distintas dependencias donde se llevan a cabo:

### ***Zona de gestación y control***

Estos alojamientos están divididos en dos zonas diferenciadas: la zona de cubrición donde se van a alojar las cerdas vacías en espera de celo para ser cubiertas y la zona de control de la gestación donde, una vez que las cerdas fueron cubiertas, permanecen durante un período de 28 días aproximadamente, hasta que se confirma su estado de

gestación. En estas zonas el efecto de la temperatura es especialmente importante, siendo la óptima de 18-20 °C. La ventilación máxima es de 200 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y animal, y la tasa de ventilación mínima, establecida como % de la máxima, es del 20%. La velocidad máxima del aire será de 0,20 m s<sup>-1</sup> y la humedad del 70%.

Debido a la imposibilidad de hacer un sistema de limpieza todo dentro-todo fuera es necesario mantener unos mínimos de limpieza en ambas zonas, para lo que se llevan a cabo las siguientes actividades:

Diariamente: raspado y limpieza del emparrillado situado debajo y detrás de cada cerda.

Cada dos semanas: limpieza con agua a presión y desinfección así como limpieza y revisión del sistema de alimentación, tolvas, bebederos, etc.

Periódicamente y en función del producto empleado: desinfección ambiental y de fosas así como labores de desratización.

Periódicamente: apertura y vaciado de las fosas.

#### ***Zona de gestación comprobada***

En esta zona se encuentran todas las cerdas preñadas a la espera de su paso a la nave de parideras, lo que va a tener lugar 110 días después de su inseminación, 5 días antes del parto.

El objetivo común durante la fase de gestación es la obtención de altas productividades, para el cual se debe:

- Conseguir muchos óvulos viables.
- Evitar la mortalidad ovular, embrionaria y fetal.
- Conseguir un adecuado desarrollo de los fetos.
- Preparar la hembra para el parto durante los últimos días de gestación.
- Mantener la madre en las mejores condiciones para que pueda hacer frente al parto y posterior lactación (la madre no debe perder peso ya que esto daría pie a muertes fetales y agotamiento durante la lactación).
- Evitar, en la medida de lo posible, cerdas improductivas.

Los únicos controles que se hacen en este período son los de alimentación y problemas de tipo sanitario como cojeras, abortos, etc.

Por lo que respecta a las actividades relacionadas con la limpieza de las instalaciones, serán las mismas que en las zonas de gestación y control.

### ***Zona de partos o parideras***

Son las dependencias en las que paren las cerdas y amamantan a los lechones hasta que alcanzan el desarrollo suficiente para poder ser separados de su madre. El manejo en esta zona es el llamado todo dentro-todo fuera de modo que está dividida en módulos independientes que se llenan en el mismo día y se vacían también de una sola vez. Solo una vez lavados y desinfectados vuelven a recibir animales.

Esta parte de la explotación es muy exigente en cuanto al manejo y control ambiental pues en ella se encuentran animales con necesidades contrapuestas: calor para los lechones que disponen de escasas reservas energéticas y frescura para madres que además tienen que nutrirse suficientemente para producir toda la leche necesaria.

En esta zona, las actividades que se llevan a cabo se pueden agrupar en las siguientes fases: Parto: antes de trasladar a la madre a la paridera se debe realizar una desparasitación interna y externa con productos apropiados con el fin de evitar la transmisión de parásitos de la madre a los lechones durante la lactancia. Se debe introducir a los animales limpios en maternidad, lavándolos con agua y jabón, sobre todo en la región mamaria y en la parte posterior, con el fin de reducir el riesgo de transmisión de enfermedades de la madre al lechón y de contaminaciones ascendentes del aparato genital. La sala de maternidad debe estar perfectamente limpia y desinfectada, seca, con una temperatura ambiente apropiada y bien ventilada. Al manejar las cerdas por lotes, todo dentro-todo fuera, el intervalo entre las primeras y las últimas en parir en una misma sala no debe ser superior a 3-4 días.

Parto: la duración de la gestación no es fija, aunque se toman como media los 114-115 días desde la primera cubrición, siendo normal una variación de  $\pm 4$  días y la camada uno de los factores de variación de la duración más importantes: a mayor número de lechones, menor duración de la gestación. La atención de los partos es fundamental en la explotación porcina. Todo el esfuerzo anterior obtiene su resultado en este preciso momento, el 75% de los lechones nacidos muertos es durante el parto, y muchas de las causas de mortalidad de los lechones lactantes están relacionadas con problemas durante el parto. Una vez que tuvo lugar el parto, las atenciones que se les prestarán a los lechones serán las siguientes: secado inmediatamente después de nacer; limpieza del moco de nariz y boca, debiendo reanimar a los lechones que nacen medio asfixiados; colocarlos bajo la influencia del foco de calor y asegurarse un perfecto

encalostrado de todos los lechones. Por lo que respecta a la madre, la atención a la misma se basa, fundamentalmente, en la vigilancia e intervenir solo en caso de necesidad.

Postparto: nada más nacer el lechón se le corta el cordón umbilical a unos tres centímetros del cuerpo, atándolo y desinfectándolo. El hierro se podría aplicar el mismo día del nacimiento, sin embargo, es preferible hacerlo al día siguiente. Por lo que respecta al destete, es preferible destetar por las tardes, de este modo mejorarán los resultados de los lechones en el postdestete y se reducirán las luchas entre las cerdas al agruparlas. En principio, cuanto más tarde se destete el lechón, mejor para él, de hecho la legislación prohíbe destetes con edades inferiores a los 21 días (R. D. 1135/2002, de 31 de octubre, relativo a las normas mínimas para la protección de cerdos). Una vez rematado el parto, varios factores centrarán la atención de las personas encargadas de la explotación durante las primeras horas de vida del lechón: consecución de las temperaturas apropiadas, tanto para los lechones como para la madre, control de la ingesta de calostro en cantidades suficientes y evitar aplastamientos. En esta zona la temperatura óptima se sitúa en torno a los 25-30 °C. La ventilación máxima es de 250 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> y animal, y la tasa de ventilación mínima, establecida como % de la máxima, es del 25%. La velocidad máxima del aire será de 0.20 m s<sup>-1</sup> y la humedad del 70%.

#### ***Zona de lechoneras***

En esta zona de la nave se alojan los lechones destetados hasta que alcanzan el peso necesario para salir de la explotación con destino a los cebaderos, es decir, 20 kg de p.v. El sistema de manejo es el mismo que en partos, todo dentro-todo fuera.

El objetivo de esta zona es proporcionar el lechón unas condiciones óptimas, de modo que se pueda conseguir un crecimiento máximo, 350 g diarios, y la mínima dependencia del medio. El manejo general de una lechonera se basa en la observación diaria del estado sanitario de los animales, por lo que es muy importante que cada día se controle esto en el momento de dar de comer, de modo que se pueda determinar cuál es la vivacidad de los animales. Los lechones estarán alojados en esta zona un total de 35-42 días aproximadamente, en función de la edad de destete, transcurridos los cuales serán cargados en camión y trasladados a cebaderos emplazados fuera de la explotación.

#### 4.1.3.1 Flujo de animales en la explotación

Como resumen del flujo de animales en la explotación a lo largo de su vida útil, se presenta el siguiente diagrama.

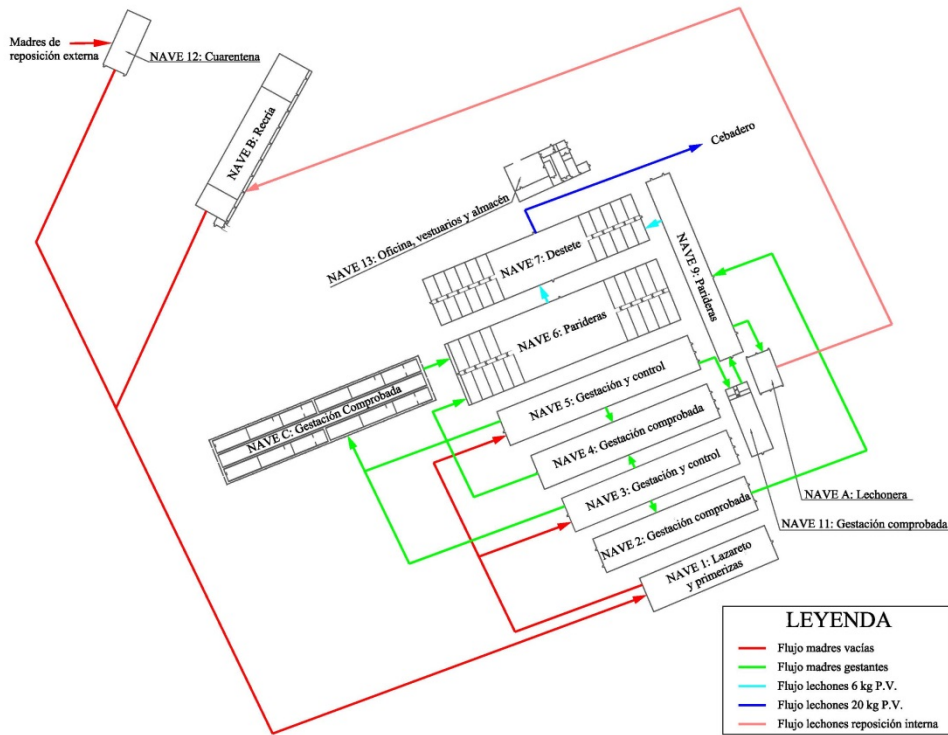


Figura 8. Diagrama de flujo de los animales en la explotación.

## 4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

### 4.2.1 Descripción del alojamiento

La sala de destete donde se llevó a cabo el diseño experimental tiene unas dimensiones interiores de 11,82 m de largo por 5,86 m de ancho, con una altura interior entre 2,50 m, en la zona del pasillo, y 2,25 m en la zona exterior. La superficie total en planta es de 69,26 m<sup>2</sup> con un volumen total de 164,50 m<sup>3</sup>. La sala dispone de un pasillo central con una anchura de 0,70 m, con 6 corrales a cada uno de los lados con una superficie por corral de 5 m<sup>2</sup> y una capacidad total en la sala de 300 animales, a razón de 0,20 m<sup>2</sup>/animal. El suelo de la sala es de emparrillado plástico. Los separadores entre corrales están formados por vallas metálicas que permiten a los animales el contacto, mientras que los separadores colocados entre el pasillo y los corrales son continuos y de material plástico. El techo está formado por placas de fibrocemento con aislante de poliuretano proyectado. La instalación de ventilación está constituida por un extractor

helicoidal para pared de 500 mm de diámetro, 230 VAC, 50 Hz, 1330 rpm y 480 W de potencia. La entrada de aire se realiza mediante dos ventanas con deflectores de aire, ubicadas en el cerramiento opuesto al ventilador a ambos lados de la puerta de acceso a la sala. La instalación de calefacción por suelo radiante está constituida por dos placas calefactoras en la zona central de cada corral. Las placas calefactoras son para agua caliente fabricadas en poliéster con unas dimensiones de 1,20 x 0,40 m y 2,90 l de capacidad. En la Figura 9 se muestra una vista general de la sala y sus dimensiones.

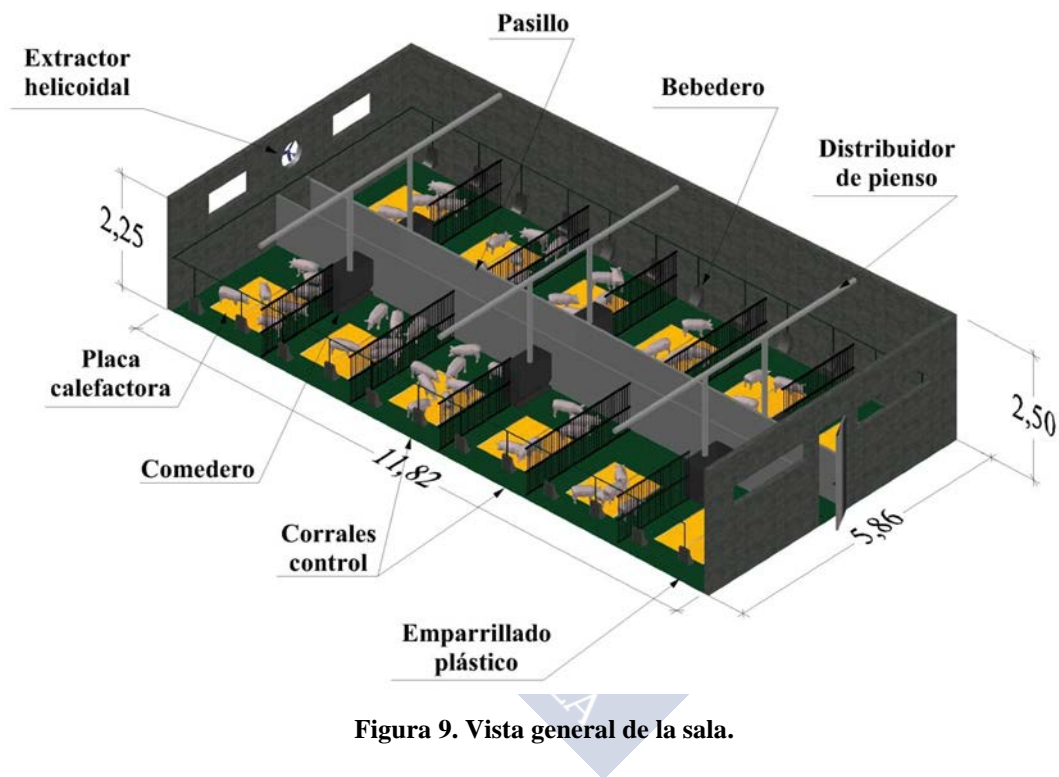


Figura 9. Vista general de la sala.

#### 4.2.2 Variables medidas en la sala

Las diferentes variables ambientales a estudiar se monitorizaron mediante sondas distribuidas en el interior y exterior del alojamiento de destete. Estas sondas se conectaron mediante el cableado correspondiente a colectores de datos para el almacenamiento de las lecturas y posterior procesamiento de las mismas. Se distinguen tres tipos de variables:

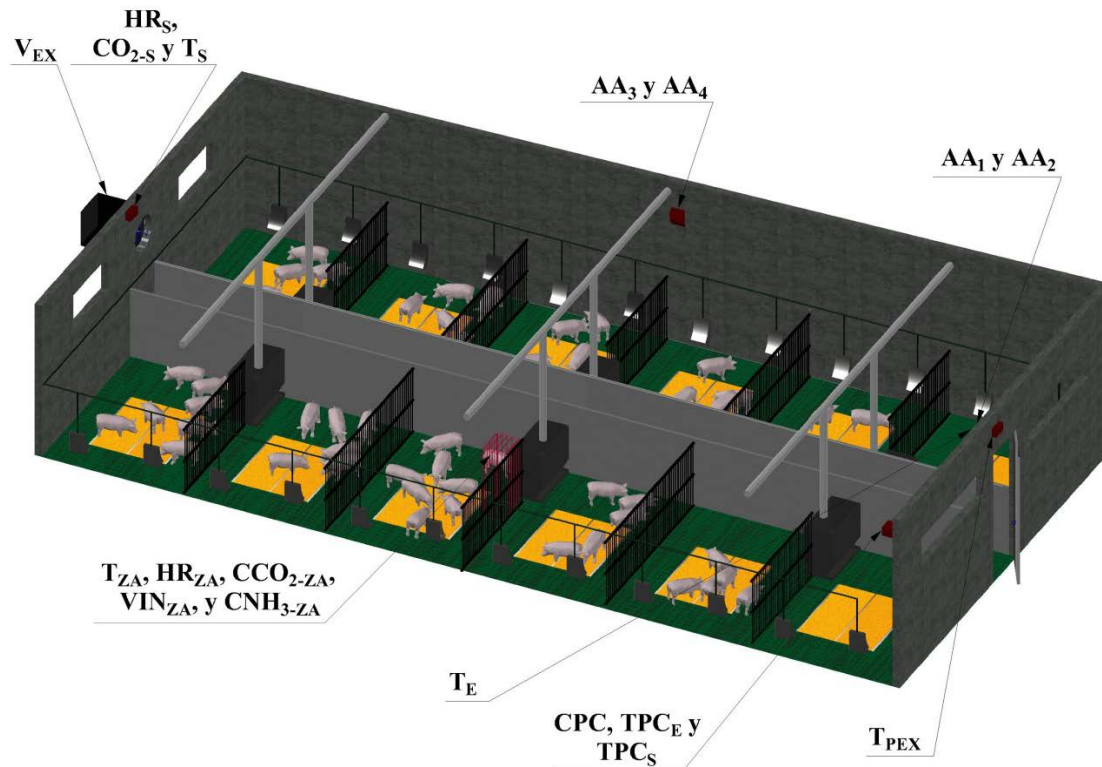
*Ambientales:* temperatura en la entrada de aire ( $T_E$ ), temperatura en la zona animal ( $T_{ZA}$ ), temperatura en la salida de aire ( $T_S$ ), temperatura del pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ),

temperatura en el corral 1 ( $T_{A1}$ ), temperatura en el corral 2 ( $T_{A2}$ ), temperatura en el corral 3 ( $T_{A3}$ ), temperatura en el corral 4 ( $T_{A4}$ ) temperatura en el corral 5 ( $T_{A5}$ ), temperatura en el corral 6 ( $T_{A6}$ ), temperatura entre corrales 3 y 4 a una altura de 0 m ( $T_{A7}$ ), temperatura entre corrales 3 y 4 a 1 m ( $T_{A10}$ ) temperatura entre corrales 3 y 4 a 2 m ( $T_{A13}$ ), temperatura en pasillo central ( $T_{A8}$ ) y temperatura en corral 7 ( $T_{A9}$ ), humedad relativa en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ), humedad relativa en la salida del aire ( $HR_S$ ), velocidad del aire en la zona animal ( $VIN_{ZA}$ ), concentración de  $CO_2$  en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ), concentración de  $CO_2$  en la salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ) y concentración de  $NH_3$  en la zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ).

*De carácter animal:* Actividad animal ( $AA$ ) y peso animal.

*Relativas al funcionamiento de las instalaciones:* velocidad del aire de salida ( $V_{EX}$ ), caudal del fluido calefactor ( $CPC$ ), temperatura del fluido calefactor en la entrada de la sala ( $T_{PCE}$ ) y temperatura del fluido calefactor en la salida de la sala ( $T_{PCS}$ ).

En la Figura 10 se muestra una vista de la sala y la ubicación de todos los sensores utilizados. Para la medición de las variables ambientales que afectan directamente a los animales, se colocó una jaula en cuyo interior se ubicaron todos los sensores. Esta jaula se instaló con la finalidad de proteger los sensores de los daños y deterioros que podrían causar los animales. La jaula tiene unas dimensiones de 0,28 x 0,28 x 0,70 m. Está formada por barras de acero liso de sección circular.



**Figura 10.** Ubicación de los sensores utilizados para la medición de la velocidad exterior del aire ( $V_{EX}$ ) y en la zona animal ( $VIN_{ZA}$ ), humedad relativa en la salida del aire ( $HR_S$ ) y en zona animal ( $HR_{ZA}$ ), concentración de  $CO_2$  en salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ) y en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ), temperatura en la salida del aire ( $T_S$ ), en la zona animal ( $T_{ZA}$ ), en la entrada del aire ( $T_E$ ), en pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ), en la entrada del fluido calefactor en la sala ( $T_{PCE}$ ) y en la salida ( $T_{PCS}$ ), concentración de  $NH_3$  en la zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ), caudal del fluido calefactor ( $CPC$ ) y de la actividad animal ( $AA_1, AA_2, AA_3$  y  $AA_4$ ).

En la Figura 11 ofrece una vista de la sala en planta, donde se muestran las ubicaciones de las sondas de temperatura que fueron utilizadas para la distribución de temperaturas en la sala.

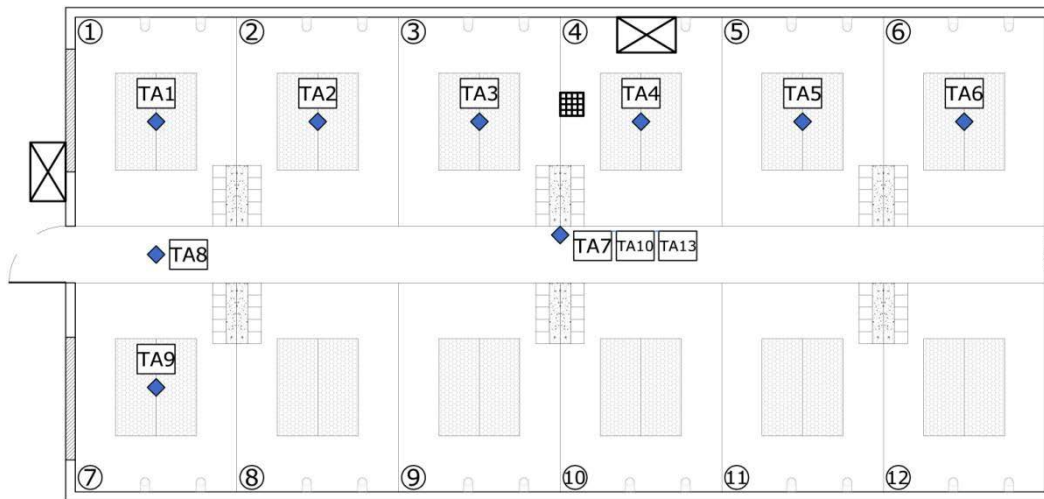


Figura 11. Ubicación de los sensores de temperatura en el corral 1 ( $T_{A1}$ ), 2 ( $T_{A2}$ ), 3 ( $T_{A3}$ ), 4 ( $T_{A4}$ ), 5 ( $T_{A5}$ ) y 6 ( $T_{A6}$ ), temperatura entre corrales 3 y 4 a una altura de 0 m ( $T_{A7}$ ), 1 m ( $T_{A10}$ ) y 2 m, ( $T_{A13}$ ), temperatura en pasillo central ( $T_{A8}$ ) y temperatura en corral 7 ( $T_{A9}$ ).

#### 4.2.2.1 Variables ambientales

Los sensores para medición de las variables ambientales fueron instalados en el pasillo exterior, en la zona de entrada del aire, en la zona animal dentro de la jaula de sensores y en la zona de salida del aire. Las especificaciones técnicas de cada sensor se muestran en la Tabla 2.

##### ***Sensores de medición en el pasillo exterior***

Temperatura del pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ): sonda de temperatura Campbell 108, tipo BetaTherm 100K6A1B Thermistor fabricada por Campbell Scientific©. Está ubicada en la pared del pasillo exterior de la sala, a 2,20 m de altura.

##### ***Sensores de medición en la zona de entrada del aire***

Temperatura en la entrada de aire ( $T_E$ ): sonda híbrida de temperatura/humedad, modelo S-THB-008 de Onset Computer Corporation©. Ubicada en una de las ventanas de la zona de entrada del aire.

##### ***Sensores de medición en zona animal (ZA)***

Los sensores están ubicados en la zona animal, dentro de la jaula de sensores a una altura de 0,40 m (Figura 12).

- Velocidad del aire ( $V_{INZA}$ ): sonda omnidireccional de alambre caliente, modelo HD103T.0, fabricado por Delta.

- Concentración de  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ ): sonda de tecnología infrarroja (NDIR), fabricada por Delta Ohm©, modelo HD37BTV.1.
- Concentración de  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ): sonda electroquímica modelo MGS 150, de Murco©.
- Temperatura ( $T_{\text{ZA}}$ ) y humedad relativa ( $\text{HR}_{\text{ZA}}$ ): sonda híbrida de temperatura/humedad modelo S-THB-008 de Onset Computer Corporation©.



**Figura 12. (A) Detalle de las sondas de medición de: (A) velocidad del aire ( $V_{\text{IN}_{\text{ZA}}}$ ), (B) concentración de  $\text{CO}_2$  ( $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ ), (C) concentración de  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) y (D) temperatura ( $T_{\text{ZA}}$ ) y humedad relativa ( $\text{HR}_{\text{ZA}}$ ).**

### ***Sensores de temperaturas interiores del alojamiento***

Temperaturas a un metro de altura en el corral 1 ( $T_{A1}$ ), el corral 2 ( $T_{A2}$ ), en el corral 3 ( $T_{A3}$ ), en el corral 4 ( $T_{A4}$ ) en el corral 5 ( $T_{A5}$ ), en el corral 6 ( $T_{A6}$ ), temperaturas entre corrales 3 y 4 a una altura de 0 m ( $T_{A7}$ ), a 1 m ( $T_{A10}$ ) a 2 m ( $T_{A13}$ ), temperatura en pasillo central a 1,80 m ( $T_{A8}$ ) y temperatura en corral 7 ( $T_{A9}$ ) a 0 m de altura: sonda de temperatura Campbell 107 tipo BetaTherm 100K6A1B Thermistor fabricada por Campbell Scientific©.

### ***Sensores de medición en la zona de salida del aire***

Los sensores están ubicados en la parte superior del ventilador extractor a una altura de 2,10 m. (Figura 13)

- Concentración de CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2-S}$ ): sonda de tecnología infrarroja (NDIR), fabricada por Delta Ohm©, modelo HD37BTV.1.
- Temperatura  $T_S$  y humedad relativa  $HR_S$ : sonda híbrida de temperatura/humedad modelo S-THB-008 de Onset Computer Corporation©.



**Figura 13. (A) Detalle de la sonda híbrida de medición de la temperatura y la humedad relativa en la salida del aire ( $T_S$  y  $HR_S$  respectivamente) y (B) sensor de medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en la salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ).**

**Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sensores utilizados para la medición de la concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ), y en la salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ), temperatura en pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ), en la entrada del aire ( $T_E$ ), en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) y en la salida del aire ( $T_S$ ), y humedad relativa en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y en la salida del aire ( $HR_S$ ), velocidad del aire en la zona animal ( $VIN_{ZA}$ ) y concentración de NH<sub>3</sub> en zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ).**

Variables	Unidad	Rango de medición	Rango de funcionamiento	Precisión	Conexión
$C_{CO_2-ZA}$ y $C_{CO_2-S}$	ppm	0...5000	0°C...50°C	±50ppm+4% de la medición, a 20°C, 50% HR y 1013 Pa	Colector a canal abierto (N.O.)
$T_{PEX}$	°C	-5...95	-55... 100°C	±0,5°C desde -5°C hasta 90°C	Entrada campbell H/L
$T_E, T_{ZA}$ y $T_S$ ,	°C	-40...75	-40...75°C	±0,2°C para 0° a 50°C	RJ-45
$HR_{ZA}$ y $HR_S$	%	0...100	-40...75°C	±2,5% de 10% hasta 90%, máximo +/- 3,5%	RJ-45
$VIN_{ZA}$	m s <sup>-1</sup>	0,08...5	-10...+80°C	Rango (0,08-0,99)m s <sup>-1</sup> ±0,06m s <sup>-1</sup> Rango (1-5)m s <sup>-1</sup> ±0,3 m s <sup>-1</sup>	Cable apantallado
$T_{A1}, T_{A2},$ $T_{A3}, T_{A4},$ $T_{A5}, T_{A6},$ $T_{A7}, T_{A8},$ $T_{A9}, T_{A10}$ y $T_{A13}$	°C	-35...50°C	-50...100°C	±0,2°C para 0°C a 50°C	Entrada campbell
$C_{NH_3-ZA}$	ppm	> de 1	-40...+40°C 0...95%.	> 1 ppm.	Cable apantallado

#### 4.2.2.2 Variables de carácter animal

##### *Actividad animal*

La medición de la actividad animal (AA) se realizó basándose en la metodología Pedersen y Pedersen (1995). Al igual que en este trabajo, la actividad animal se midió mediante detectores infrarrojos (Figura 14) cuyas características técnicas se muestran en la tabla 2. Estos sensores fueron configurados en dos posiciones, para que respondan a 2 o a 4 pulsos, enviando una señal de salida a relé. El colector de datos registró el tiempo que permanecen cerrados estos relés, expresándose la actividad de los animales en segundos. La configuración del sensor para 2 o 4 pulsos permite la distinguir entre actividad animal ligera ( $AA_L$ ) y actividad animal moderada ( $AA_M$ ). Se instalaron 4

detectores de infrarrojo pasivo, modelo RX-40QZ, fabricados por OPTEXs©. Los sensores fueron ubicados encima de la puerta de entrada a la sala a una altura de 2,30 m ( $AA_1$  y  $AA_2$ ) y en la pared lateral opuesta a los corrales de control a idéntica altura ( $AA_3$  y  $AA_4$ ). La diferencia con la metodología propuesta por Pedersen y Pedersen (1995) es que no se realizó modificación alguna sobre el sensor para la obtención de la señal analógica, sino que se empleó de forma directa la salida digital del mismo para su procesado. La actividad animal ( $AA_1$ ,  $AA_2$ ,  $AA_3$  y  $AA_4$ ) fue estimada, según la expresión:

$$AA = \frac{T_A}{T_D} \quad [EC.1]$$

Donde:

$AA$  = Actividad animal

$T_A$  = Tiempo de actividad

$T_D$  = Intervalo de almacenamiento de datos (tiempo de activación del sensor en 10 minutos).

De este modo es posible comparar diferentes ciclos con sensores comerciales sin ningún tipo de alteración.



Figura 14. Detectores de presencia para la medición de la actividad ligera ( $AA_L$ ) y actividad moderada ( $AA_M$ ).

### ***Peso animal***

Para el control de peso de los animales se realizaron tres pesadas a lo largo del ciclo: a la entrada de los animales en el alojamiento, en el cambio de pienso, cuando se pasa de administrar pienso de iniciación a otro de transición, que coincide aproximadamente con la mitad del ciclo, y una última pesada el día de salida de los animales. Se utilizó una báscula modelo MI2000 fabricada por SANVE srl© (Figura 15). En la Tabla 3 se muestran sus especificaciones técnicas.



Figura 15. Báscula para el pesaje de los animales.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de los equipos utilizados para la medición de variables animales.

Variable	Unidad	Rango de medición	Rango de funcionamiento	Precisión	Conexión
AA	pulsos (s)	Zona de 12 x 12 m, 78 zonas	-20...+50°C 0... 95% HR	±0,020%.	Cable apantallado
Peso	kg	0 a 300	0...50 °C	< ±0,020%	-

#### 4.2.2.3 Variables relativas al funcionamiento de las instalaciones de ventilación y calefacción

##### *Velocidad del aire de salida ( $V_{EX}$ )*

Para la medición de la velocidad del aire de salida así como para el cálculo del caudal de aire extraído por el ventilador se instaló un anemómetro de alambre caliente en un conducto prismático de chapa galvanizada de 0,55x0,55 m de sección y 1,20 m de longitud, fijado a la salida del ventilador. Para ello se empleó el método propuesto por Hinz y Linke (1998) adaptado al sensor usado. Las características y la disposición del conducto se muestran en las figuras Figura 17, Figura 18 y Figura 19. En dicho conducto se practicaron 5 perforaciones laterales para la inserción del anemómetro a distintas localizaciones en horizontal. Esto permitió generar una cuadrícula de 25 puntos para la medición de velocidades en la sección del conducto. Manteniendo el ventilador a la máxima velocidad, se midió la velocidad durante un período de 2 minutos en cada punto, registrando su valor a cada segundo. La velocidad media en la sección se calculó como media de las velocidades medidas. Una vez calculada la velocidad media y su relación

con las mediciones en las distintas posiciones, se ubicó el sensor de velocidad en la posición que se marca en la Figura 16. Esta posición proporcionó la velocidad medida más próxima a la velocidad media. El cálculo del caudal extraído por el ventilador ( $Q$ ) se obtuvo mediante:

$$Q_v = 1,143 v_m S \quad [EC.2]$$

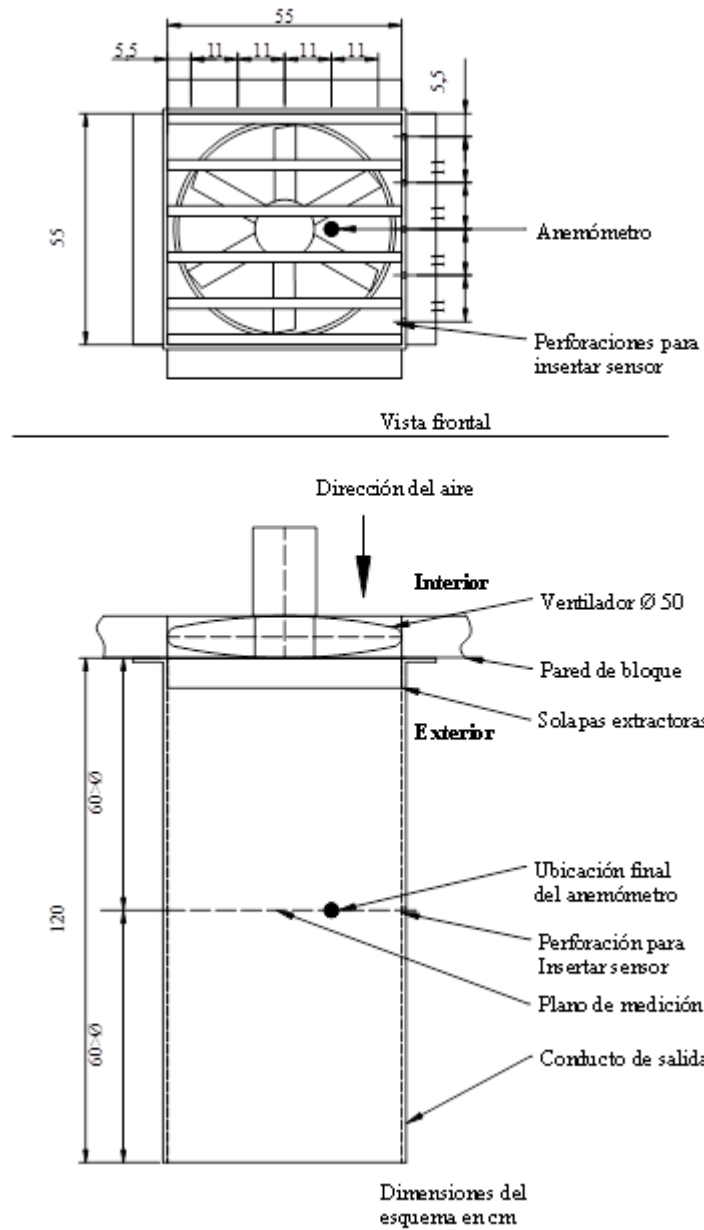
Donde:

$Q_v$  = caudal extraído por el ventilador

1,143 = relación entre la velocidad media ( $V_m$ ) en todos los puntos medidos y la velocidad medida en el punto de ubicación del sensor en  $m s^{-1}$

$S$  = sección del conducto en  $m^2$





**Figura 16. Instalación del anemómetro para la medida de la velocidad del aire extraído por el sistema de ventilación.**

En las Figura 17 y Figura 18 se puede observar la campana, conteniendo el anemómetro, y su instalación a la salida del ventilador. El anemómetro empleado fue el modelo HD2903TTC310 de tipo hilo caliente, fabricado por Delta Ohm©, en la Tabla 4 se especifican sus características.



Figura 17. Vista lateral del anemómetro y de la campana de extracción.



Figura 18. Vista frontal del anemómetro y de la campana de extracción.

### ***Potencia suministrada a la calefacción (PSC)***

*Caudal del fluido calefactor (CPC):* la instalación de calefacción se encuentra compuesta por una tubería metálica que recorre toda la longitud de las ventanas de entrada de aire y las 24 placas calefactoras agrupadas de dos en dos con unas dimensiones de 1,2 x 0,5 m cada una. Mediante el uso de un caudalímetro ultrasónico (Figura 19), se mide el caudal del fluido calefactor (CPC).



Figura 19. Caudalímetro ultrasónico para medición de CPC.

El modelo de caudalímetro instalado fue el FST020 IP65 NEMA 4X, de Siemens©. Fue instalado sobre la tubería de entrada de agua caliente al recirculador, fabricada en polietileno, con un diámetro interior de 20 mm. En Tabla 4 se recogen las demás especificaciones técnicas del caudalímetro.

*Temperatura del fluido calefactor:* sondas de temperatura Campbell 108, tipo BetaTherm 100K6A1B Thermistor fabricadas por Campbell Scientific©. Están ubicadas en la superficie de la tubería de entrada a la sala ( $T_{PCE}$ ) y en la superficie de la tubería en el exterior de la sala ( $T_{PCS}$ ). La diferencia entre estas dos temperaturas es el salto térmico.

Conociendo el caudal y el salto térmico que se produce en el circuito de calefacción, mediante la expresión EC.3 se puede calcular la potencia suministrada al sistema de calefacción ( $PSC$ ).

$$PSC = CPC * \rho * C_e * (T_{PCE} - T_{PCS}) * F_c \quad [EC. 3]$$

Donde:

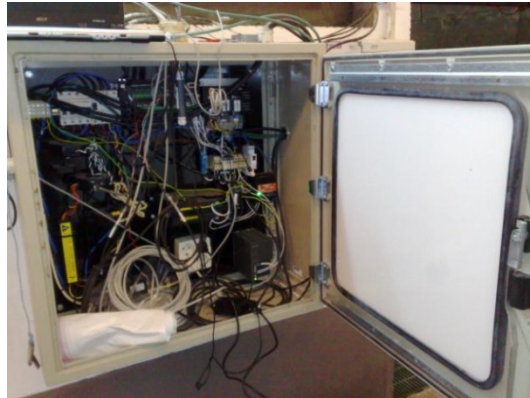
$PSC =$	Potencia suministrada a las placas calefactoras (W).
$CPC =$	Caudal del fluido calefactor ( $m^3 h^{-1}$ ).
$\rho =$	Densidad del agua a 31°C ( $kg m^{-3}$ ).
$C_e =$	Calor específico del agua a 31°C ( $J kg^{-1} °C^{-1}$ ).
$T_{PCE} =$	Temperatura de entrada (°C).
$T_{PCS} =$	Temperatura de salida (°C).
$F_c =$	Factor de conversión de horas a segundos ( $h s^{-1}$ ).

El calor específico del agua se consideró para una temperatura de 31°C debido a que, aproximadamente, este valor corresponde con la media de los valores de  $T_{PCE}$  y de  $T_{PCS}$  a lo largo de todos los ciclos analizados. Esta constante se tomó de ASHRAE, 2001.

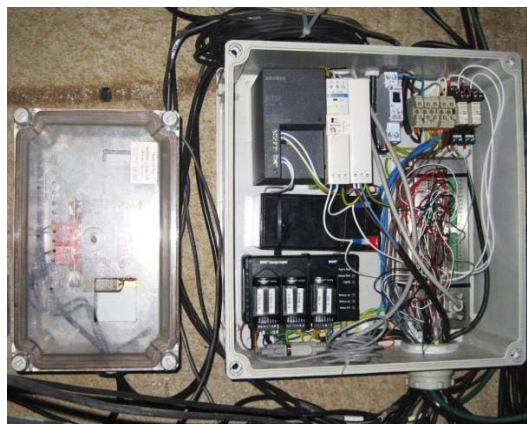
**Tabla 4. Especificaciones técnicas de los sensores utilizados para la medición de las variables de las instalaciones.**

Variable	Unidad	Rango de medición	Rango de funcionamiento	Precisión	Conexión
$V_{EX}$	$ms^{-1}$	0,05...1 $ms^{-1}$	10...+60°C 5...98% HR	$\pm 0.06 ms^{-1} + 3\%$ de la medida	Cable apantallado
		0,1...2 $ms^{-1}$		$\pm 0.06 ms^{-1} + 3\%$ de la medida	
		0,20...10 $ms^{-1}$		$\pm 0.4 ms^{-1} + 3\%$ de la medida	
		0,20...20 $ms^{-1}$		$\pm 0.4 ms^{-1} + 3\%$ de la medida	
$CPC$	$m^3 h^{-1}$	$\pm 12 ms^{-1}$ bidireccional	-10... +50°C	$\pm 1-2\%$ del caudal, para velocidades $> a 0,3 ms^{-1}$ .	Cable apantallado
$TPC_{EY}$ $TPC_S$	°C	-5...95	-55... 100°C	$\pm 0,5^\circ C$ desde $-5^\circ C$ hasta $90^\circ C$	Entrada campbell H/L

Las temperaturas medidas con los sensores modelo 108 fueron registrados en dos colectores CR-10X Campbell Scientific Ltd (24 canales de medición analógica, 8 puertos I/O). Los demás datos fueron registrados en dos colectores HOBO H-22 Onset Computer Corporation (15 canales, con 6 canales para sensores inteligentes y 3 conexiones para módulos analógicos). Para alojar los colectores, se instalaron dos cuadros control, el cuadro I (Figura 20) ubicado en el exterior de la sala y el cuadro II (Figura 21) en el interior de la sala ubicado sobre la pared izquierda a una altura de 1,5 m en el corral 4.



**Figura 20. Cuadro de control I.**



**Figura 21. Cuadro de control II.**

A su vez se realizaron mediciones exteriores en el recinto del alojamiento ganadero tomando datos de temperatura ( $T_{EX}$ ), humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del aire mediante una estación meteorológica EIC Control U-30 (Onset Computer Corporation) mostrada en la Figura 22.



**Figura 22. Estación meteorológica exterior.**

Todas las variables fueron muestreadas cada segundo registrando la media de estas lecturas cada 10 minutos.

#### 4.3 TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS

##### 4.3.1 Caracterización ambiental de la sala

###### 4.3.1.1 Período de estudio

Se analizaron 7 ciclos de producción. En la Tabla 5 se muestran las fechas de inicio y finalización de cada ciclo.

**Tabla 5. Fecha de inicio y fin de cada uno de los ciclos.**

Ciclo	Inicio	Fin
I	06/10/2011	16/11/2011
II	21/11/2011	03/01/2012
III	09/01/2012	20/02/2012
IV	27/02/2012	04/04/2012
V	12/04/2012	21/05/2012
I	31/05/2012	11/07/2012
II	19/07/2012	31/08/2012

Además las variables  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $T_{ZA}$  fueron estudiadas por períodos definidos por los requerimientos de temperatura: periodo crítico, post-crítico y final. La Tabla 6 muestra la fecha de inicio y finalización de cada uno de los períodos de cada ciclo.

Tabla 6. Fecha de inicio y fin para cada periodo para cada uno de los ciclos.

Ciclo	Periodo	Inicio	Fin
<b>I</b>	Crítico	06/10/2011	20/10/2011
	Post-crítico	20/10/2011	03/11/2011
	Final	03/11/2011	16/11/2011
<b>II</b>	Crítico	21/11/2011	05/12/2011
	Post-crítico	05/12/2011	19/12/2011
	Final	19/12/2011	03/01/2012
<b>III</b>	Crítico	09/01/2012	23/01/2012
	Post-crítico	23/01/2012	06/02/2012
	Final	06/02/2012	20/02/2012
<b>IV</b>	Crítico	27/02/2012	12/03/2012
	Post-crítico	12/03/2012	26/03/2012
	Final	26/03/2012	04/04/2012
<b>V</b>	Crítico	12/04/2012	26/04/2012
	Post-crítico	26/04/2012	10/05/2012
	Final	10/05/2012	21/05/2012
<b>VI</b>	Crítico	31/05/2012	14/06/2012
	Post-crítico	14/06/2012	28/06/2012
	Final	28/06/2012	11/07/2012
<b>VII</b>	Crítico	19/07/2012	02/08/2012
	Post-crítico	02/08/2012	16/08/2012
	Final	16/08/2012	31/08/2012

#### 4.3.1.2 Pruebas de normalidad

Para llevar a cabo las pruebas de normalidad se empleó el software estadístico SPSS (versión 22). El programa SPSS, Statistical Product and Service Solutions, es un conjunto de herramientas de tratamientos de datos y análisis estadístico. Posee una estructura de tipo modular que incluye un módulo base además de una serie de módulos opcionales. El editor de datos es la ventana principal, similar a una hoja de cálculo. Esta ventana muestra dos contenidos diferentes: los datos propiamente dichos, y las variables del archivo acompañadas del conjunto de características que las definen.

El problema de los estadísticos de normalidad es que, con muestras muy grandes, son demasiado sensibles a pequeñas desviaciones de la normalidad (Pardo y Ruiz, 2005). Como en este caso disponemos de muestras muy grandes se decidió tomar muestras más pequeñas, para ello se tomaron muestras aleatorias de 300 casos de cada variable para cada ciclo. La muestra aleatoria simple de tamaño  $n$  es elegida por un método en el que cada colección de  $n$  elementos de la población tiene la misma probabilidad de formar la muestra (Navidi, 2006). Se escogieron 300 casos por

considerarlo un número suficientemente representativo de la población, (correspondientes a dos días de medición) y no demasiado grande para que los estadísticos de normalidad no pierdan fiabilidad.

*Estadístico de Kolmogorov-Smirnov (K-S)*

La prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para una muestra (Kolmogorov, 1933) es una prueba de bondad de ajuste a una determinada distribución teórica de probabilidad. Esta prueba se emplea para decidir cuando un conjunto de datos se ajusta a una distribución de probabilidad dada. Esta prueba se lleva a cabo a través de las distribuciones acumulativas teórica y la observada. (Matín *et al.*, 2008).

La expresión para D es:

$$D = \max |S_n(x) - F_0(x)| \quad \text{[EC.4]}$$

Donde;

$S_n(x)$  = Distribución acumulativa observada

$F_0(x)$  = Distribución acumulativa teórica

***Transformación de Johnson***

Es posible transformar los datos no-normales a datos normales, a través de técnicas como el Sistema de Familias de Distribuciones de Johnson. La función de transformación de Johnson es seleccionada de entre tres familias de funciones dentro del sistema de familias (Tabla 7). Para ajustar un conjunto de datos no-normales, es necesario establecer criterios que permitan determinar la pertenencia del mismo a una de las tres familias. Cada una de ellas tiene asociada una transformación de X a una variable normal estándar Z, así como condiciones especiales para los parámetros estimados y el rango de la variable X, que deben tenerse en cuenta cuando se va a escoger la familia con la que se quiere trabajar.

**Tabla 7. Clasificación de familias de distribuciones de Johnson.**

Familia Johnson	Transformación	Condiciones para los parámetros	Condición para X
Sistema acotado (S <sub>B</sub> )	$Z = \gamma + \eta \ln \left( \frac{x - \epsilon}{\lambda_j + \epsilon - x} \right)$	$\eta, \lambda_j > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \epsilon < \infty$	$\epsilon < x < \epsilon + \lambda_j$
Log-normal del sistema (S <sub>L</sub> )	$Z = \gamma + \eta \ln \left( \frac{x - \epsilon}{\lambda_j} \right)$	$\eta > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \epsilon < \infty$	$x > \epsilon$
Sistema sin límites (S <sub>V</sub> )	$Z = \gamma + \eta \sinh^{-1} \left( \frac{X - \epsilon}{\lambda_j} \right)$	$\eta, \lambda_j > 0, -\infty < \gamma < \infty, -\infty < \epsilon < \infty$	$-\infty < x < \infty$

Fuente: Chou *et al.* (1998)

Donde:

Y= dato transformado

X= dato sin transformar

$\epsilon, \lambda_j, \gamma$  = parámetros de Johnson

La transformación de variables se lleva a cabo mediante el programa Minitab, el cual evalúa las tres funciones con las estimaciones actuales de los cuatro parámetros, transforma los datos y ejecuta una prueba de normalidad de los datos transformados. Los cuatro parámetros se han optimizado hasta que una de las tres funciones de transformación produce el mejor resultado de la prueba de normalidad.

#### 4.3.1.3 Diferencia entre medias

##### **Prueba de Levene**

Para las variables temperatura, humedad relativa y concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal, se realizó un análisis estadístico de diferencia de medias mediante el software estadístico SPSS (versión 22).

El estadístico del F del ANOVA de un factor debe cumplir el supuesto de homocedasticidad. Homocedasticidad o igualdad de varianzas significa que las J poblaciones muestreadas poseen la misma varianza; el incumplimiento de este supuesto debe ser vigilado, particularmente cuando los grupos tienen distinto tamaño, mediante el contraste de Levene. La prueba Levene (1960) consiste en llevar a cabo un análisis de varianza de un factor utilizando como variable dependiente la diferencia en valor absoluto entre cada puntuación individual y la media (o la mediana, o la media recortada) de su grupo. (Pardo y Ruiz, 2005).

El estadístico de Levene se define como:

$$W_1 = \frac{(N-k) \sum_{i=1}^k N_i (Z_i - Z_{...})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_i)^2} \quad [\text{EC.5}]$$

Donde:

$W_1$  = es el resultado de la prueba

$k$  = es el número de diferentes grupos a los que pertenecen los casos muestreados

$N$  = es el número total de casos en todos los grupos

$N_i$  = es el número de casos en el grupo

$Y_{ij}$  = es el valor de la variable medida para el  $j$ ésimo caso del  $i$ ésimo grupo

$$Z_{ij} = \begin{cases} |Y_{ij} - \bar{Y}_i| \\ |Y_{ij} - \tilde{Y}_i| \end{cases}$$

Donde

$\bar{Y}_i$  = es la media del " $i$ "ésimo grupo

$\tilde{Y}_i$  = es la mediana del " $i$ "ésimo grupo

#### *Pruebas de Brown- Forsythe y Welch*

Si no se cumple el supuesto de homocedasticidad no se puede utilizar ANOVA, por lo tanto para conocer si existe diferencia entre las medias de los ciclos para cada variable se utilizaron los estadísticos de Brown-Forsythe y Welch. El estadístico de Brown-Forsythe (1974) representa una alternativa robusta al estadístico F del ANOVA cuando no se puede asumir que las varianzas poblacionales son iguales. El numerador del estadístico de Brown-Forsythe es el mismo que el del estadístico F; el denominador se obtiene estimando cada varianza poblacional por separado. (Pardo y Ruiz 2005). La prueba de Brown-Forsythe es el estadístico F como resultado de un análisis de una vía ordinaria de la varianza de las desviaciones absolutas de la mediana.

El estadístico de Brown-Forsythe calcula a partir de la ecuación:

$$W_2 = \frac{(N-g) \sum_{k=1}^g n_k (Z_k - \bar{Z})^2}{(g-1) \left\{ \sum_{k=1}^g \sum_{i=1}^{n_k} (Z_{ki} - \bar{Z}_k)^2 \right\}} \quad [\text{EC.6}]$$

Donde:

$$Z_{ki} = |Y_{ki} - \tilde{Y}_k|$$

$$\bar{Z}_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^{n_k} Z_{ki}$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^g \sum_{i=1}^{n_k} Z_{ki}$$

$$\tilde{Y}_k = \text{mediana } (Y_{k1}, Y_{k2}, Y_{k3}, \dots, Y_{kn_k})$$

$N = n$  total de la muestra

$g =$  número de grupos

El estadístico de Welch (1951) también representa una alternativa robusta al estadístico F del ANOVA cuando no se puede asumir que las varianzas poblacionales son iguales. Se distribuye según el modelo de probabilidad F, pero con los grados de libertad corregidos. (Pardo y Ruiz, 2005).

El estadístico de Welch calcula a partir de la ecuación:

$$t_1 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad [\text{EC.7}]$$

Donde:

$$s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad [\text{EC.8}]$$

en este caso,  $s_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}$  no es la varianza combinada

$s^2 =$  es el estimador sin sesgo de la varianza de las dos muestras,

$n =$  número de grupos, 1 = grupo uno, 2 = grupo dos

La distribución de este estadístico es aproximadamente igual a una distribución t ordinaria con los grados de libertad calculados según:

$$g.l. = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{(n_1-1)} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{(n_2-1)}} - 2 \quad [EC.9]$$

### ***Prueba de Games-Howell***

La prueba a posteriori de Games-Howell es una prueba adecuada cuando no se cumple la hipótesis de homogeneidad de varianzas. Esta prueba, proporciona intervalos de confianza para la diferencia de medias entre los diferentes grupos y si esas diferencias de medias resultan estadísticamente significativas. A la hora de interpretar los resultados y de determinar si existe una diferencia significativa entre cada uno de los grupos se procede de la misma manera que cuando se asumen varianzas iguales (las hipótesis que se contrastan en la prueba son las mismas). Games-Howell, método muy similar al de Tukey. Se basa en la distribución del rango estudentizado de Tukey y en un estadístico T en el que, tras estimar las varianzas poblacionales suponiendo que son distintas, se corrigen los grados de libertad mediante la ecuación de Welch. Mediante esta ecuación se calculan los grados de libertad, disminuyendo el error por la no homogeneidad de varianzas. También existe una modificación de la ecuación de la t de student, presentando la siguiente ecuación:

$$t_2 = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad [EC.10]$$

Donde:

- t = Estadístico equivalente a t de Student
- $\bar{x}_1$  = Media aritmética del grupo 1
- $x_2$  = Media aritmética del grupo 2
- $s_1^2$  = Varianza del grupo 1
- $s_2^2$  = Varianza del grupo 2
- $n_1$  = Tamaño de la muestra 1
- $n_2$  = Tamaño de la muestra 2

El cálculo de los grados de libertad se realiza con la fórmula siguiente:

$$gl = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1-1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2-1}} - 2 \quad [EC.11]$$

Donde:

- gl = Grados de libertad
- $s_1^2$  = Varianza del grupo 1
- $s_2^2$  = Varianza del grupo 2
- $n_1$  = Tamaño de la muestra 1
- $n_2$  = Tamaño de la muestra 2

El error estándar queda definido por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)} \quad [EC.12]$$

- $\sigma$  = Error estándar
- $s_1^2$  = Varianza del grupo 1
- $s_2^2$  = Varianza del grupo 2
- $n_1$  = Tamaño de la muestra 1
- $n_2$  = Tamaño de la muestra 2

Los intervalos de confianza son construidos a partir de la siguiente expresión:

$$\bar{x}_1 - \bar{x}_2 \pm t \sqrt{\frac{1}{2} \left( \frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2} \right)} \quad [EC.13]$$

- $\sigma$  = Error estándar
- $\bar{x}_1$  = Media aritmética del grupo 1
- $\bar{x}_2$  = Media aritmética del grupo 2
- $s_1^2$  = Varianza del grupo 1
- $s_2^2$  = Varianza del grupo 2
- $n_1$  = Tamaño de la muestra 1
- $n_2$  = Tamaño de la muestra 2

El valor crítico es calculado usando los valores “q” tabulados, correspondientes a la distribución del rango studentizado de Tukey  $Q_{\alpha}^* \sqrt{2}$ , k,gl, donde k es el número de medias y gl los grados de libertad.

#### 4.3.2 Estimación de la $C_{NH_3-ZA}$ a través de la relación con otras variables

##### 4.3.2.1 Período de estudio

La Tabla 8 muestra el período de datos utilizado. Se escogió el ciclo X y en concreto el período entre el 2 al 17 de Marzo, porque las mediciones de ( $C_{NH_3-ZA}$ ) fueron correctas durante ese tiempo. Del mismo modo, se escogió este período para realizar el patrón de concentración de las variables ( $C_{NH_3-ZA}$ ), ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y  $HR_{ZA}$ , tratado en la última parte de este trabajo. Además se efectuó un filtrado de datos para las variables ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y  $HR_{ZA}$  para eliminar lecturas erróneas de los sensores. Los días analizados se agruparon de acuerdo con las temperaturas de consigna establecidas, la Tabla 8 muestra el período correspondiente a cada temperatura.

**Tabla 8. Datos analizados.**

Ciclo	Temperatura de consigna	Período utilizado
X	26°C	02/03/2013-06/03/2013
	25°C	08/03/2013-17/03/2013

Se realizaron medias de horarias de los datos diezminutales y después se realizó la media con todos los días del periodo obteniéndose la media diaria, hasta el total de 24 horas, para obtener evolución diaria de las variables.

##### 4.3.2.2 Pruebas de normalidad

###### **Transformaciones de Cox-Box**

Se utilizó la transformación de Box-Cox para para testar la normalidad de variable dependiente ( $C_{NH_3-ZA}$ ), mediante la extensión de xlsta instalada en Excel 2010. Las transformaciones de Box-Cox son una familia de transformaciones potenciales, para corregir sesgos en la distribución de errores, para corregir varianzas desiguales (para diferentes valores de la variable predictora) y principalmente para corregir la no linealidad en la relación (mejorar correlación entre las variables). La transformación

estabiliza la variabilidad y produce que la desviación alrededor del modelo sea más normalmente distribuida. La transformación potencial está definida como una función continua que varía con respecto a la potencia lambda ( $\lambda_{BC}$ ). Para los datos ( $Y_1, \dots, Y_n$ ). Se realiza la transformación  $Y'_i = Y_i^{(\lambda_{BC})}$  de la siguiente manera:

$$Y_i^{(\lambda_{BC})} = \begin{cases} K_1(Y_i^{\lambda_{BC}} - 1) & \text{si } \lambda_{BC} \neq 0, \\ K_2 \ln(Y_i) & \text{si } \lambda_{BC} = 0 \end{cases}$$

$K_2$  es la media geométrica de los valores  $Y_1, \dots, Y_n$ . Siendo la media geométrica la raíz N-ésima del producto de los N elementos.

$$K_2 = \left( \prod_{i=1}^n Y_i \right)^{1/n} = (Y_1 Y_2 \dots Y_n)^{1/n} \quad [\text{EC.14}]$$

$K_1$  es un parámetro que depende de  $K_2$  y de  $\lambda_{BC}$  así:

$$K_1 = \frac{1}{\lambda_{BC} * K_2^{\lambda_{BC} - 1}} \quad [\text{EC.15}]$$

Existen diferentes valores de  $\lambda_{BC}$ , para cada valor de se realiza la transformación, y se debe elegir la que se acerque al máximo a los datos. En este caso, la opción optimizar del programa XLSTAT permite encontrar el valor óptimo de  $\lambda_{BC}$ . Una vez encontrado los valores  $\lambda_{BC}$  se transforma la variable.

#### 4.3.2.3 Prueba T para dos muestras independientes

La prueba para dos muestras independientes permite contrastar hipótesis referidas a la diferencia entre dos medias independientes. Dos poblaciones normales. La prueba T es una tipificación de la diferencia entre las dos medias muestrales. Pardo y Ruiz (2005) Esta tipificación se obtiene de la siguiente expresión:

$$t_3 = \frac{(\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\hat{\sigma}_{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}} \quad [\text{EC.16}]$$

Dónde:

$\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$  = medias muestrales

$\mu_1 - \mu_2$  = medias poblacionales

$\hat{\sigma}_{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2}$  = error típico de la diferencia

Cuando las varianzas poblacionales son iguales (como la muestra de este estudio) el error típico de la diferencia se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$\hat{\sigma}_{\bar{Y}_1 - \bar{Y}_2} = \sqrt{\frac{S_{n_1-1}^2}{n_1} + \frac{S_{n_2-1}^2}{n_2}} \quad [\text{EC.17}]$$

Donde:

$S_{n_1-1}^2$  y  $S_{n_2-1}^2$  = varianzas muestrales insesgadas

El estadístico se distribuye según el modelo de probabilidad t de student  $n_1 + n_2 - 2$  con grados de libertad.

#### 4.3.2.4 Análisis de correlación

Mediante el software estadístico SPSS (versión 22) se realizaron dos análisis de correlación, uno para el grupo temperatura de consigna 26°C y otro para el grupo temperatura de consigna 25°C entre las variables ( $C_{NH_3-ZA}$ ), ( $C_{CO_2-ZA}$ ),  $HR_{ZA}$ ,  $T_{ZA}$ ,  $T_{PEX}$ ,  $VIN_{ZA}$ ,  $V_{EX}$ ,  $AA_L$  y  $AA_M$ . La variable de  $AA_L$  resulta de la suma de  $AA_1$  y  $AA_3$  (sensores de actividad ligera) y la  $AA_M$  de la suma de  $AA_2$  y  $AA_4$  (sensores de actividad moderada). La  $AA_L$  y  $AA_M$  para la temperatura de consigna de 25°C registró valores más bajos debido a que se perdieron datos de los sensores  $AA_1$  y  $AA_2$  ubicados frente a los corrales control, y estos sensores son los que presentaban valores de actividad más altos.

El coeficiente de correlación de Pearson es un coeficiente que estudia el grado de relación lineal entre dos variables. Se representa por la letra  $r$  y se obtiene tipificando el

promedio de los productos de las puntuaciones diferenciales de cada caso (desviaciones de la media) en las dos variables correlacionadas:

$$r_{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n S_x S_y} \quad [\text{EC.18}]$$

Donde  $x_i$  e  $y_i$  se refieren a las puntuaciones diferenciales de cada par,  $n$  al número de casos y  $S_x$  y  $S_y$  a las desviaciones típicas de cada variable. El coeficiente de correlación de Pearson toma valores entre -1 y 1.

Para contrastar la diferencia entre los valores del coeficiente de correlación obtenidos a partir de los dos grupos se utilizó la transformación Z de Fisher, que es un estadístico obtenido a partir de  $r$ .

$$Z = \frac{Z_{r1} - Z_{r2}}{\sqrt{\frac{1}{n_1 - 3} + \frac{1}{n_2 - 3}}} \quad [\text{EC.19}]$$

Donde  $Z_{r1}$  y  $Z_{r2}$  son los valores de Z correspondientes a los coeficientes de correlación y  $n_1$  y  $n_2$  el tamaño muestral de los dos grupos.

Cuando el Z de Fisher  $> 1,96$  (valor crítico para un nivel de significación = 0,05) esta diferencia será significativa.

#### 4.3.2.5 Análisis de regresión

A partir de la tabla de correlación resultante, se escogieron las variables que obtuvieron los valores más altos y significativos de  $r$  con la variable ( $C_{NH_3-ZA}$ ) para realizar un análisis de regresión para los dos grupos (26 y 25°C de consigna) mediante el software estadístico SPSS (versión 22). Se tomó como variable dependiente la ( $C_{NH_3-ZA}$ ). Primero se realizó un análisis de regresión simple entre:  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$ ;  $C_{NH_3-ZA}$  y  $HR_{ZA}$ ;  $C_{NH_3-ZA}$  y  $T_{PEX}$ ;  $C_{NH_3-ZA}$  y  $V_{EX}$  para la temperatura de consigna de 26°C y  $C_{NH_3-ZA}$  y  $V_{EX}$  para la temperatura de consigna de 25°C. Por otra parte se realizó un análisis de regresión lineal múltiple, con el resto de variables  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $T_{PEX}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $V_{EX}$  para el grupo con temperatura de consigna de 26°C y con  $V_{EX}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $VIN_{ZA}$  y  $HR_{ZA}$  para el grupo con temperatura de consigna de 25°C. Se eliminaron los modelos con coeficientes

no significativos. La significación estadística muestra las variables predictoras incorporadas en los análisis y que son significativas con un nivel de confianza del 95%.

*Supuesto de no-colinealidad entre las variables*

La colinealidad es analizada a través de dos índices: la tolerancia ( $T$ ) y el factor de inflación de la varianza ( $FIV$ )

La tolerancia está basada en la correlación múltiple de un determinado regresor con los restantes, su valor es:

$$T_i = 1 - R_i^2 \quad [EC.20]$$

Siendo  $R_i^2$  la correlación múltiple al cuadrado de dicho regresor con los restantes.

Se puede decir que existe un problema de multicolinealidad cuando la tolerancia  $< 0,10$ .

La FIV se define como la inversa de la tolerancia.

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad [EC.21]$$

Este valor no debe ser mayor de 10.

*Supuesto de independencia*

Para estudiar la independencia o incorrelación entre los residuos (diferencias entre los valores observados y los valores pronosticados) se utilizó el estadístico de Durbin-Watson (ecuación 32)

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad [EC.22]$$

Donde

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = \text{residuos}$$

El estadístico DW oscila entre 0 y 4, cuando el estadístico toma valores entre 1,5 y 2,5 se asume que los residuos son independientes (Pardo y Ruiz, 2005).

El error típico de la estimación ( $S_e$ ) de cada modelo, se obtiene de la siguiente expresión:

$$S_e = \sqrt{\sum \frac{(Y_i - \hat{Y}_i)^2}{(n-2)}} \quad [EC.23]$$

Donde

$Y_i$  = puntuaciones de la variable dependiente

$\hat{Y}_i$  = pronósticos efectuados con la recta de regresión

$n$  = tamaño muestral

### 4.3.3 Evolución de la concentración de las variables, $C_{NH_3-ZA}$ , $C_{CO_2-ZA}$ y $HR_{ZA}$

#### 4.3.3.1 Análisis matemático

La expresión senoidal ( $\alpha$ ) empleada para el ajuste de la evolución diaria de cada variable estudiada ( $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  y  $HR_{ZA}$ ) es:

$$\alpha(t) = A \sin(\omega t + \varphi) + B \quad [EC.24]$$

Donde

$A$  = amplitud en ppm para la  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  y en % para la  $HR_{ZA}$

$\omega$  = pulsación en  $\text{rad min}^{-1}$

$\varphi$  = ángulo inicial de fase en rad

$B$  = término independiente o desfase de ordenadas en ppm para la  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  y en % para la  $HR_{ZA}$

Para realizar el ajuste de las series de valores de  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  y  $HR_{ZA}$  a la expresión [EC.13], se obtuvieron los valores característicos  $A$ ,  $\omega$ ,  $\varphi$  y  $B$  según las expresiones:

$$A = \frac{\text{Valor}_{\text{máx}} - \text{Valor}_{\text{mín}}}{2} \quad [EC.25]$$

Donde

$V_{\text{máx}}$  = valor máximo de  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  (en ppm) y  $HR_{ZA}$  (en %).

$V_{\text{mín}}$  = valor mínimo de  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  (en ppm) y  $HR_{ZA}$  (en %).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad [EC.26]$$

Donde

$T$  = período de la onda, 1440 minutos o un día

$$\varphi = \omega t_0 \quad [\text{EC.27}]$$

Donde

$t_0$  = tiempo en minutos en el que la onda toma el valor medio, tomado como positivo en caso de que ésta vaya adelantada y negativo en caso de que vaya retrasada.

$B$  = Valor<sub>medio</sub> de la onda, es decir valor medio de la variable.



# **Capítulo 5.**

## **Resultados y discusión**

---





## Capítulo 5. Resultados y discusión

### 5.1 CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA DE LA SALA

Se analizaron un total de siete ciclos de producción de cerdos destetados con un peso vivo entre 6 y 20 kg. Las Figura 23 y Figura 24 resumen las características más significativas para cada ciclo.

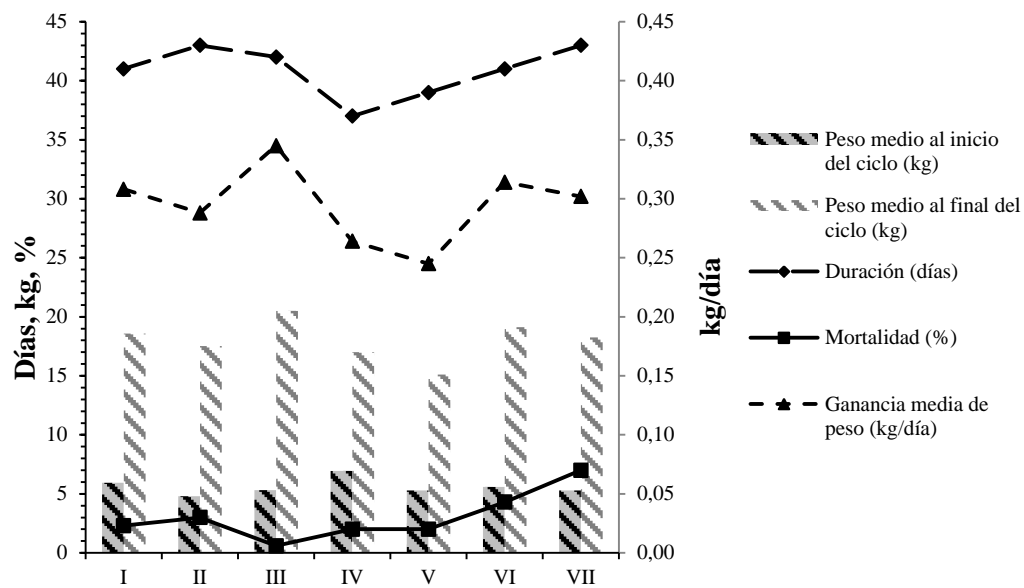
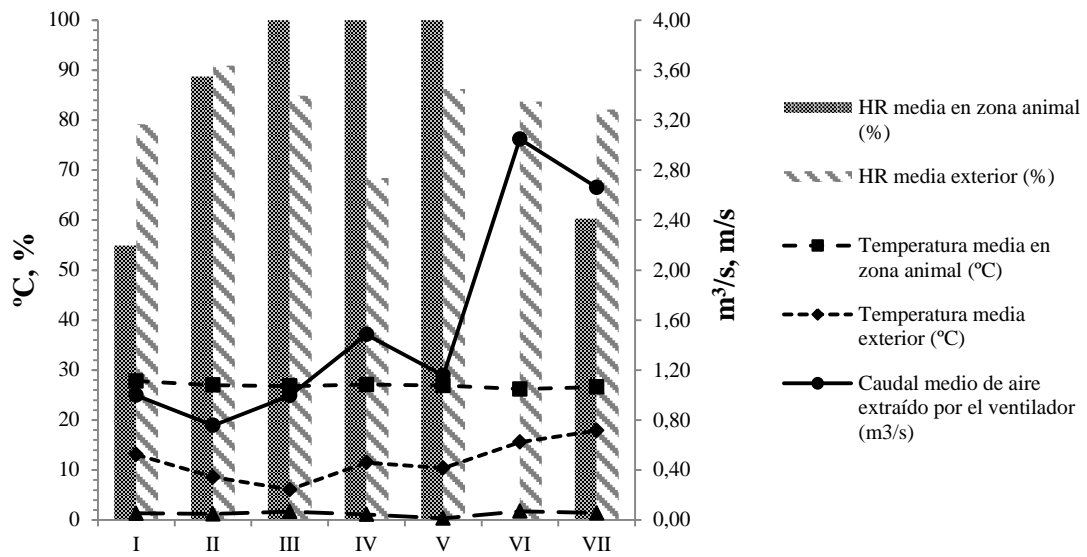


Figura 23. Peso medio al inicio del ciclo, peso medio al final del ciclo, ganancia media de peso y porcentaje de mortalidad de los animales y duración para cada ciclo estudiado.

La duración media de un ciclo es de 41 días, dentro de un rango de 37 a 43. El peso medio de cada lechón al inicio del ciclo es de 5,60 kg, mientras que el peso medio al final del ciclo es de 18,03 kg, lo que implica una ganancia media diaria de 0,295 kg, oscilando entre 0,245 y 0,345 kg. Las tasas de mortalidad están en el rango de 0,6 a 7,0%, con una media de 3,06%.



**Figura 24. Humedad relativa media en zona animal, humedad relativa media en el exterior, temperatura media en zona animal, temperatura media exterior, caudal medio de aire extraído por el ventilador y velocidad del aire en zona animal para cada ciclo.**

La temperatura media interior para todos los ciclos es de 26,9°C, y varía en un rango entre 26,2°C para el ciclo VI y 27,8°C para el ciclo I. Las temperaturas medias exteriores muestran gran variabilidad, con valores entre 17,9°C y 6,1°C, afectando al funcionamiento del sistema de control en términos de mantenimiento de la temperatura interior. Se observa una tendencia positiva entre la temperatura media exterior y el caudal medio de aire extraído por el ventilador, con un coeficiente de correlación de 0,68 (Figura A- 1 en apéndice). Cuando las temperaturas exteriores son bajas, el flujo es muy similar, ya que se ve afectado principalmente por la tasa mínima de ventilación definida por el controlador. Del mismo modo, durante los ciclos con altas temperaturas exteriores, los caudales altos se ven afectados por la tasa máxima de ventilación establecida.

La velocidad media del aire varía entre 0,014 m s<sup>-1</sup> para el ciclo VI, a 0,070 para el ciclo V. Este rango es adecuado para las recomendaciones de bienestar animal. No existe correlación entre la velocidad interior media y la media del volumen de aire extraído.

Las humedades medias exteriores oscilan entre el 68,4 y el 90,9%, con un valor medio de 82,2%, mientras que en la interiores existe mayor variabilidad, entre el 54,9 y el 100%, con una media de 84,0%. Destaca el hecho de que tres de los ciclos analizados (III, IV y V) estén permanentemente en saturación, incluso con el mínimo valor de

humedad exterior. Estos valores fueron registrados cuando la temperatura media ambiente estuvo entre 6,1 y 11,5°C.

### 5.1.1 Caracterización ambiental de la sala

Para la caracterización ambiental de la sala se estudiaron siete ciclos de producción, analizando datos diezminutales de las variables ambientales asociadas al confort de los animales temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ), humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ).

#### 5.1.1.1 Comprobación de los supuestos de normalidad y homocedasticidad para las variables temperatura concentración de $NH_3$ y $CO_2$ en zona animal en datos diezminutales

Muchos de los procedimientos estadísticos utilizados exigen el cumplimiento de determinados supuestos sobre las poblaciones donde se extraen los datos que se desean estudiar, estos supuestos son la normalidad y la homocedasticidad.

##### *Supuesto de normalidad*

Por lo tanto primero se comprobó la normalidad de las tres variables estudiadas: ( $T_{ZA}$ ), ( $HR_{ZA}$ ) y ( $C_{CO_2-ZA}$ ). La Tabla 9 muestra el estadístico de Kolmorov-Smirnov (para muestras con  $n >$  de 50) acompañado de su correspondiente nivel crítico (Sig.), para las variables  $T_{ZA}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$ . Esta prueba permite contrastar la hipótesis nula de que los datos muestrales proceden de poblaciones normales. Se rechazará la hipótesis de normalidad cuando el nivel crítico sea menor que el nivel de significación establecido, 0,05. Solo para la  $T_{ZA}$  en el ciclo I, la  $HR_{ZA}$  en los ciclos I y VII y la  $C_{CO_2-ZA}$  en el ciclo I presentan un nivel crítico mayor de 0,05 por lo que se puede concluir que proceden de poblaciones normales, para el resto de los ciclos las variables necesitan de una transformación.

**Tabla 9. Pruebas de normalidad: estadístico (Est.) grados de libertad (gl), nivel crítico (Sig.) para las variables temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ), humedad en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) para todos los ciclos.**

Variable	Ciclo	Est.	gl.	Sig.
$T_{ZA}$	I	0,13	300	0,00**
	II	0,10	300	0,00**
	III	0,09	300	0,00**
	IV	0,09	300	0,00**
	V	0,14	300	0,00**
	VI	0,03	300	0,20
	VII	0,09	300	0,00**
$HR_{ZA}$	I	0,04	300	0,20
	II	0,13	300	0,00**
	VII	0,05	300	0,09
$C_{CO_2-ZA}$	I	0,04	300	0,20
	II	0,17	300	0,00**
	III	0,15	300	0,00**
	IV	0,08	300	0,00**
	V	0,13	300	0,00**
	VI	0,19	300	0,00**
	VII	0,07	300	0,00**

\*\*  $p \leq 0,01$

A través de la técnica del Sistema de Familias de Distribuciones de Johnson se transformaron las variables. La Tabla 10 muestra las ecuaciones obtenidas. Aplicando estas ecuaciones a los datos es posible transformar los datos no-normales a datos normales.

**Tabla 10. Transformaciones de Johnson de tipo sistema sin límites ( $S_U$ ) y sistema acotado ( $S_B$ ) para las variables temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ), humedad en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) para todos los ciclos.**

Variable	Ciclo	Tipo Transformación	Ecuación
$T_{ZA}$	I	$S_U$	$0,259437+0,865702 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-28,1111}{0,564418} \right)$
	II	$S_U$	$2,52203+2,31490 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-28,5459}{1,11532} \right)$
	III	$S_B$	$0,101641 + 0,826166 \times \text{Ln} \left( \frac{X-27,2507}{29,1115} \right)$
	IV	$S_B$	$-0,51 + 1,11967 \times \text{Ln} \left( \frac{X-23,5512}{29,6488-X} \right)$
	V	$S_U$	$0,360668 + 0,799165 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-27,5917}{0,586694} \right)$
	VII	$S_U$	$-2,77785 + 2,16443 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-23,0563}{1,82497} \right)$
$HR_{ZA}$	II	$S_U$	$-4,13989 + 1,91732 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-55,6987}{1,19121} \right)$
$C_{CO_2-ZA}$	II	$S_U$	$-1,36659 + 1,02343 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-1838,33}{253,164} \right)$
	III	$S_U$	$-1,22428 + 1,19210 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-2115,04}{365,299} \right)$
	IV	$S_B$	$1,27253 + 1,35116 \times \text{Ln} \left( \frac{X- 961,031}{5931,44-X} \right)$
	V	$S_B$	$-0,727250 + 1,14695 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-1650,02}{401,841} \right)$
	VI	$S_U$	$-0,671249 + 0,98003 \times \text{Asenh} \left( \frac{X-1337,71}{196,902} \right)$
	VII	$S_B$	$1,19428 + 1,31584 \times \text{Ln} \left( \frac{X-465,820}{2061,13-X} \right)$

Con los nuevos valores se comprueba de nuevo la normalidad de la distribución. La Tabla 11 muestra el estadístico de Kolmorov-Smirnov. Se rechazará la hipótesis de normalidad cuando el nivel crítico sea menor que el nivel de significación establecido, 0,05. Ambos estadísticos, para las tres variables tiene asociados niveles críticos mayores

de 0,05 por lo que ahora se puede concluir que la variable  $T_{ZA}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$ , proceden de poblaciones normales.

**Tabla 11. Pruebas de normalidad: estadístico (Est.), grados de libertad (gl) y nivel crítico (Sig.) para variables temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ), humedad en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) transformadas.**

Variable	Ciclo	Est.	gl.	Sig.
$T_{ZA}$	I	0,04	300	0,20
	II	0,05	300	0,20
	III	0,05	300	0,04
	IV	0,05	300	0,20
	V	0,05	300	0,09
	VII	0,05	300	0,20
	$HR_{ZA}$	I	0,04	300
II		0,04	300	0,20
III		0,03	300	0,20
$C_{CO_2-ZA}$	IV	0,05	300	0,07
	V	0,03	300	0,20
	VI	0,04	300	0,20
	VII	0,03	300	0,20

La Figura 25 muestra el gráfico Q-Q normal, en el que se puede observar como, para todos los ciclos, los puntos correspondientes a  $T_{ZA}$  se encuentran agrupados en torno a la diagonal representada en el diagrama.

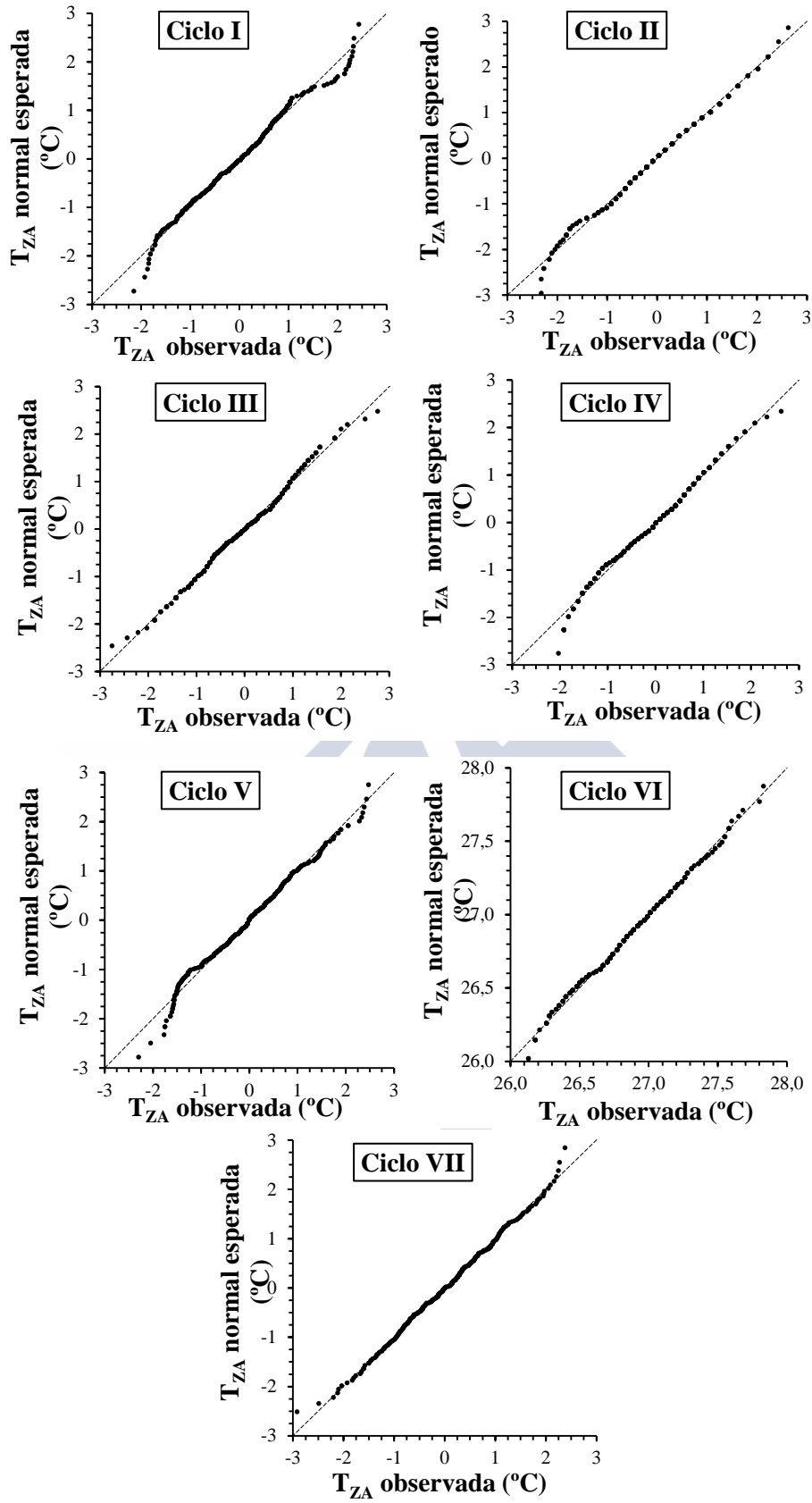


Figura 25. Gráfico Q-Q normal para la variable temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) para los ciclos I, II, III, IV, V, VI y VII.

La Figura 26 muestra el gráfico Q-Q normal para  $HR_{ZA}$ , en el que se observa como para los ciclos no saturados los puntos correspondientes a cada par se encuentran agrupados en torno a la diagonal.

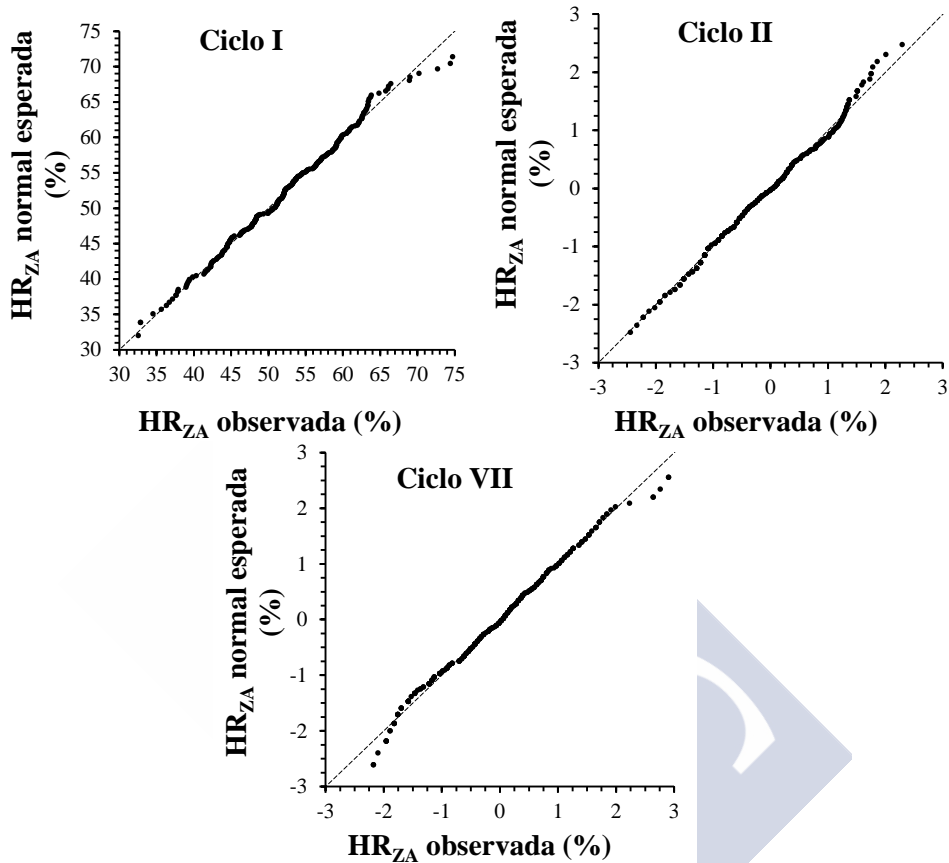


Figura 26. Gráfico Q-Q normal para la variable humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) para los ciclos I, II y VII.

La Figura 27 muestra el gráfico Q-Q normal en el que se puede observar que, para todos los ciclos,  $C_{CO_2-ZA}$  se agrupa en torno a la diagonal.

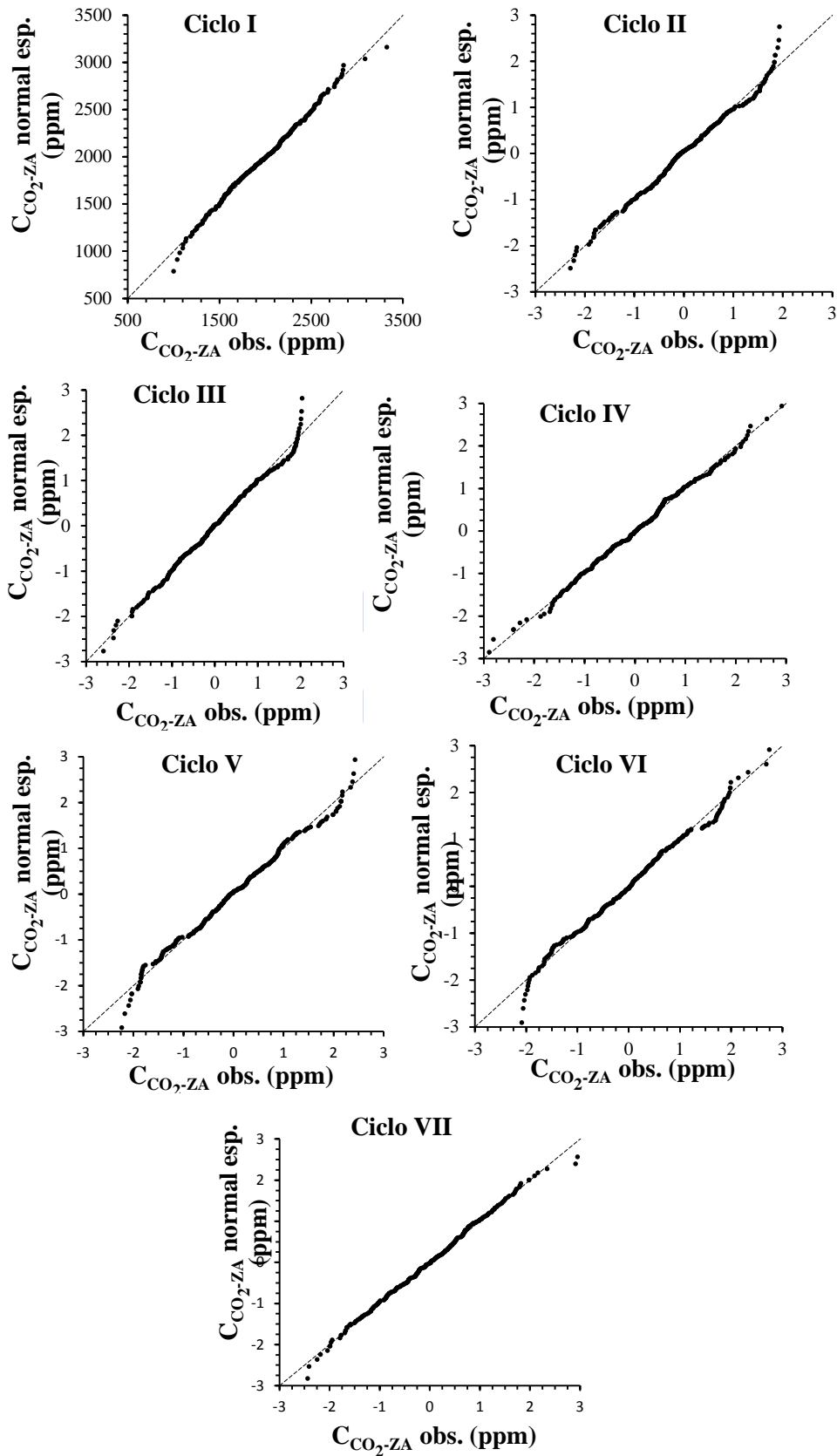


Figura 27. Gráfico Q-Q normal para la variable  $C_{CO_2}$  en zona animal  $C_{CO_2-ZA}$  para los ciclos I, II, III, IV, V, VI y VII.

### **Supuesto de homocedasticidad**

Homocedasticidad o igualdad de varianzas significa que todas las poblaciones muestreadas poseen la misma varianza; con grupos de distinto tamaño, el incumplimiento de este supuesto debe ser cuidadosamente vigilado. Esta opción permite contrastar este supuesto mediante la prueba de Levene.

La Tabla 12 contiene el contraste de Levene sobre igualdad de varianzas. Puesto que el p-valor es menor que 0,05, se debe rechazar la hipótesis de igualdad de varianzas y concluir que, en las poblaciones definidas por los ciclos de producción, las varianzas de las variables  $T_{ZA}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  no son iguales.

**Tabla 12. Prueba de homogeneidad de varianzas: estadístico de Levene ( $W_1$ ) grados de libertad de la distribución (gl1 y gl2) y nivel crítico (Sig.) para las variables temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ), humedad en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) para todos los ciclos.**

Variable	$W_1$	gl1	gl2	Sig.
$T_{ZA}$	659,30	6	41172	0,00**
$HR_{ZA}$	790,22	2	10817	0,00**
$C_{CO_2-ZA}$	832,30	6	40441	0,00**

\*\* p ≤ 0,01

#### 5.1.1.2 Evolución, distribución y estimación indirecta de la temperatura en el interior del alojamiento

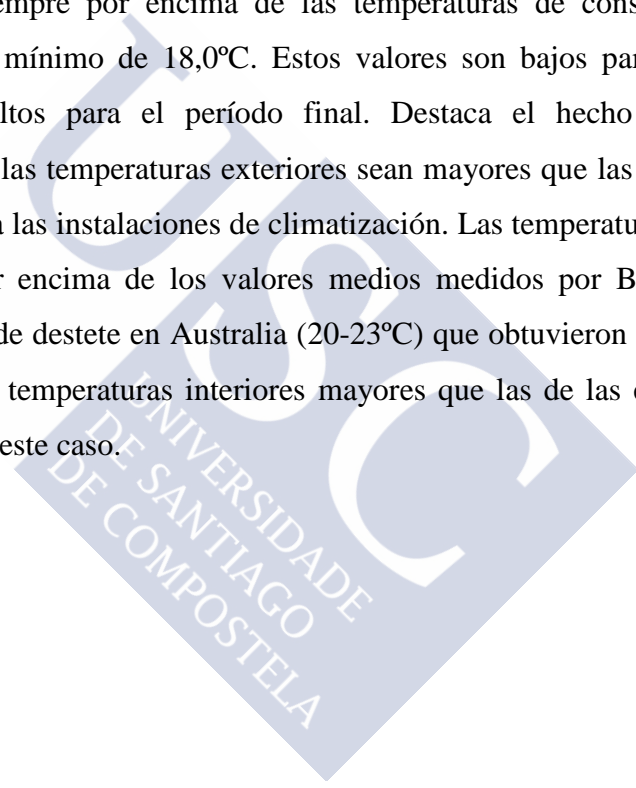
##### 5.1.1.2.1 Evolución de la temperatura durante los 7 ciclos estudiados

Cada ciclo ha sido dividido en tres períodos distintos, crítico, post-crítico y final, basado en los diferentes requerimientos de temperatura del animal. Le Dividich y Herpin (1994) distinguen dos periodos para la fase de transición: el periodo crítico correspondiente a las dos primeras semanas siguientes al destete, durante las cuales los lechones consumen sólo comida seca por primera vez, ya que en la paridera la alternaban con la leche materna, y el periodo post-crítico donde ya se establece la ingesta regular de alimentos.

Los períodos crítico y post-crítico tienen una duración de 14 días, mientras que el período final tiene una duración variable y se extiende hasta que el ciclo se completa. La Tabla 13 muestra las temperaturas media, máxima, mínima y desviación estándar en el exterior y en la zona animal obtenidas y la temperatura media de consigna establecida para cada ciclo y periodo.

Las temperaturas medias exteriores están en el rango comprendido entre 5,3 y 18,3°C, con valores máximos de 35,4°C y mínimos de -3,1°C.

Las temperaturas medias en la zona animal son mucho más uniformes, y varían entre 24,6 y 28,5°C, siempre por encima de las temperaturas de consigna, con el máximo en 34,2°C y el mínimo de 18,0°C. Estos valores son bajos para el período crítico, pero bastante altos para el período final. Destaca el hecho de que las desviaciones estándar de las temperaturas exteriores sean mayores que las interiores, lo cual se consigue gracias a las instalaciones de climatización. Las temperaturas interiores obtenidas están muy por encima de los valores medios medidos por Banhazi *et al.* (2008c) en alojamientos de destete en Australia (20-23°C) que obtuvieron resultados de desviaciones estándar de temperaturas interiores mayores que las de las exteriores, es decir, al contrario que en este caso.



**Tabla 13. Valor medio (Med.), máximo (Máx.), mínimo (Mín.) y desviación estándar (SD) para la temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ), la temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) obtenidas y temperatura media de consigna ( $T_C$ ) establecida para cada ciclo y período.**

Ciclo	Período	$T_{EXT}$				$T_{ZA}$				$T_C$
		Med.	Máx.	Mín.	SD	Med.	Máx.	Mín.	SD	Med.
I	Ciclo	13,12	30,22	5,26	4,65	27,82	31,70	23,2	1,00	24,8
	Período crítico	16,67	30,22	8,39	5,11	28,45	31,70	23,2	1,00	25,4
	Período post-crítico	11,50	21,70	5,26	3,11	28,07	29,10	26,9	0,40	25,0
	Período final	11,05	20,84	6,03	2,99	26,85	28,70	23,4	0,80	24,0
II	Ciclo	8,62	18,94	1,91	2,50	26,98	28,80	21,0	0,90	24,7
	Período crítico	9,38	18,94	4,19	2,41	27,57	28,80	21,0	0,60	25,8
	Período post-crítico	8,60	13,40	2,29	2,40	27,16	28,50	25,8	0,50	24,6
	Período final	7,93	18,46	1,91	2,49	26,26	28,30	23,6	0,80	23,8
III	Ciclo	6,11	15,34	-3,12	3,13	26,83	30,50	18,0	1,30	24,3
	Período crítico	7,32	15,34	0,58	2,83	28,13	30,50	18,0	0,70	25,5
	Período post-crítico	5,72	14,12	-3,12	3,12	26,71	28,70	24,6	0,80	24,2
	Período final	5,29	14,00	-1,99	3,06	25,65	27,70	24,2	0,80	23,3
IV	Ciclo	11,49	26,97	1,91	5,26	27,16	30,60	20,0	1,20	24,5
	Período crítico	10,40	23,33	2,56	4,33	28,00	29,50	20,0	0,70	25,5
	Período post-crítico	10,89	24,48	1,91	5,29	26,82	30,10	24,5	1,00	24,3
	Período final	14,12	26,97	4,97	5,64	26,36	30,60	22,7	1,50	23,1
V	Ciclo	10,44	31,56	2,98	4,38	26,92	31,80	19,3	1,40	24,7
	Período crítico	8,00	14,03	2,98	2,06	27,76	29,40	19,3	0,70	25,8
	Período post-crítico	10,26	22,80	3,91	3,27	26,82	28,40	24,3	0,80	24,5
	Período final	13,78	31,56	4,30	5,49	25,99	31,80	22,3	1,90	23,4
VI	Ciclo	15,64	35,37	6,91	4,44	26,21	34,20	22,8	1,80	23,7
	Período crítico	15,71	35,37	6,91	4,63	27,21	34,20	25,0	1,20	24,5
	Período post-crítico	16,25	34,31	7,59	5,36	26,69	34,00	23,4	2,00	23,5
	Período final	14,90	23,76	8,72	2,70	24,62	28,10	22,8	0,90	23,0
VII	Ciclo	17,88	33,21	9,44	4,13	26,57	33,00	22,3	1,80	23,9
	Período crítico	18,33	31,66	10,98	4,47	27,76	33,00	22,4	1,70	24,9
	Período post-crítico	17,62	33,21	10,69	4,21	26,61	32,80	23,5	1,60	23,9
	Período final	17,71	29,44	9,44	3,67	25,44	30,60	22,3	1,30	23,0

La Tabla 14 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch. Representan una alternativa robusta al estadístico F del ANOVA cuando no se puede asumir que las varianzas son iguales. Puede utilizar la prueba de Brown-Forsythe o la prueba de Welch para evaluar la igualdad de las medias cuando el tamaño de los grupos es desigual. Estas pruebas no presuponen la homogeneidad de la varianza. Estas pruebas son una buena

alternativa al estadístico F cuando no es posible asumir que las varianzas poblacionales son iguales. Puesto que, en ambos, el p-valor es menor que 0,05 se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la temperatura media en la zona animal de los grupos comparados no son iguales.

**Tabla 14. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadísticos de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos (gl1), grados de libertad intra-grupos corregidos (gl2) y nivel crítico (Sig.) para la variable temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

	$W_2$	$t_1$	gl1	gl2	Sig.
<b>Welch</b>		891,63	6	18069,41	0,00**
<b>Brown-Forsythe</b>	764,62		6	33514,96	0,00**

\*\*  $p \leq 0,01$

La aplicación de la prueba de Games-Howell (Tabla 15) indicó que en todos los ciclos, las medias de las temperaturas en la zona animal fueron todas diferentes y muy significativas ( $p \leq 0,01$ ), a excepción de los ciclos II y V ( $p \geq 0,05$ ) que con medias interiores muy semejantes, presentan una diferencia menor que 2°C en las temperaturas exteriores.

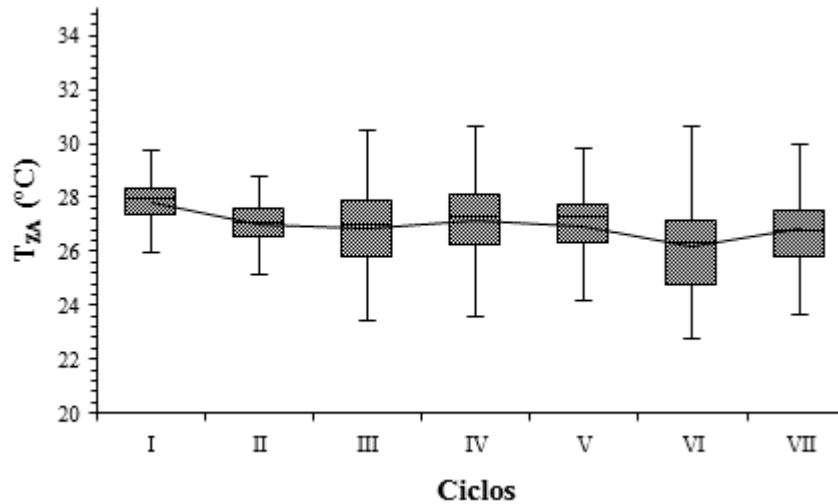
Los límites del intervalo de confianza permiten conocer que la diferencia se encuentra entre el límite superior e inferior. Cuando el 0 se encuentra dentro del intervalo, permite aceptar la igualdad de medias (ciclos II y V) y cuando el 0 está fuera del intervalo, se rechazará la igualdad de medias (en los demás ciclos).

**Tabla 15. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para la temperatura en la zona nival ( $T_{ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

Ciclo	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo de confianza	
				L.I	L.S
I-II	0,84**	0,02	0,00**	0,79	0,89
I-III	0,99**	0,02	0,00**	0,93	1,05
I-IV	0,66**	0,02	0,00**	0,60	0,72
I-V	0,90**	0,02	0,00**	0,83	0,96
I-VI	1,61**	0,03	0,00**	1,53	1,69
I-VII	1,24**	0,03	0,00**	1,17	1,32
II-III	0,15**	0,02	0,00**	0,10	0,20
II-V	0,06	0,02	0,12	-0,01	0,12
II-VI	0,77**	0,03	0,00**	0,70	0,85
II-VII	0,40**	0,03	0,00**	0,33	0,48
III-VI	0,62**	0,03	0,00**	0,53	0,71
III-VII	0,26**	0,03	0,00**	0,17	0,34
IV-II	0,18**	0,02	0,00**	0,12	0,24
IV-III	0,33**	0,02	0,00**	0,26	0,40
IV-V	0,23**	0,03	0,00**	0,16	0,31
IV-VI	0,95**	0,03	0,00**	0,86	1,03
IV-VII	0,58**	0,03	0,00**	0,50	0,67
V-III	0,10*	0,02	0,03*	0,02	0,17
V-VI	0,71**	0,03	0,00**	0,62	0,80
V-VII	0,35**	0,03	0,00**	0,26	0,44

\*  $p \leq 0,05$ . \*\*  $p \leq 0,01$ .

En la Figura 28 se observan ligeras variaciones de las temperaturas de la zona animal a lo largo del estudio, que están vinculadas a las temperaturas exteriores, aunque sin mostrar un patrón estacional claro.



**Figura 28. Temperaturas medias en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) para cada uno de los ciclos.**

Banhazi *et al.* (2008c), mediante un modelo lineal de la temperatura del aire, encontraron una correlación positiva ( $R^2 = 0,67$ ) entre la temperatura exterior y la interior. En este trabajo, los resultados muestran valores de correlación mucho más bajos, entre un rango de 0,16 para el ciclo V y 0,55 para el VII (Tabla A-5 y Tabla A-7 en apéndice). Los coeficientes de correlación más altos se corresponden con los ciclos de mayores temperaturas exteriores, (0,55 para los ciclos VI y VII) (Tabla A-6 Tabla A-7) debido a que el sistema de ventilación substituye aire caliente interior por aire caliente exterior.

Los coeficientes de correlación por debajo de 0,5 se corresponden con los ciclos II III y V, con diferencias entre la temperatura media interior y exterior de 10,6 y 8,7°C, respectivamente, cuando las temperaturas son bajas, las correlaciones también lo son, debido a que el sistema de calefacción aporta calor suficiente para mantener constante la temperatura en el alojamiento.

Durante el período crítico, la temperatura media se sitúa sobre los 28°C, por debajo del rango de 30-32°C recomendado por Muirhead y Alexander (1997). Sin embargo, el valor recomendado es excedido en algunos momentos, alcanzando valores de hasta 34,2°C. De modo similar, las temperaturas mínimas alcanzan el valor de 18,0°C, el cual está por debajo de 26°C, temperatura mínima recomendada por Le Dividich y Herpin

(1994). Generalmente, las temperaturas mínimas se registran durante el inicio de ciclo, a la entrada de los animales, y en menos de dos horas se establecen valores adecuados.

Durante el período post-crítico, los requerimientos de temperatura son menores. Sin embargo, las temperaturas medias obtenidas exceden los 24°C recomendados por Close y Stanier (1984). Las temperaturas mínimas para los ciclos VI y VII están por debajo de los mínimos recomendados, pero se muestran próximas a las recomendaciones.

Durante el período final los requerimientos de temperatura descienden drásticamente. Sin embargo las temperaturas medias obtenidas superan los valores máximos recomendados por Muirhead y Alexander (1997) en todos los ciclos, y alcanzan valores máximos de 31,8°C. En contraste, los valores medios de temperatura nunca están por debajo de los valores mínimos recomendados.

Las diferencias entre los tres períodos de cada ciclo se hacen patentes mediante la comparación estadística de las medias de las temperaturas obtenidas en la zona animal. La Tabla 16 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch. Ambos, el p-valor es menor que 0,05 se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la temperatura media en la zona animal de los grupos comparados no es igual.

**Tabla 16. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadístico de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos (gl1), grados de libertad intra-grupos corregidos (gl2) y nivel crítico (Sig.) para la temperatura en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) en período crítico, post-crítico y final para cada ciclo.**

Ciclo	Prueba	$W_2$	$t_1$	gl1	gl2	Sig.
<b>I</b>	Welch		2109,54	2	3313,77	0,00**
	Brown-Forsythe	2341,43		2	4507,91	0,00**
<b>II</b>	Welch		1632,62	2	3958,95	0,00**
	Brown-Forsythe	2139,01		2	5293,30	0,00**
<b>III</b>	Welch		5724,13	2	4011,40	0,00**
	Brown-Forsythe	5136,89		2	5919,50	0,00**
<b>IV</b>	Welch		1367,03	2	2801,93	0,00**
	Brown-Forsythe	980,53		2	2877,17	0,00**
<b>V</b>	Welch		1149,82	2	3181,43	0,00**
	Brown-Forsythe	856,49		2	2559,93	0,00**
<b>VI</b>	Welch		3164,30	2	3693,47	0,00**
	Brown-Forsythe	1708,96		2	4201,62	0,00**
<b>VII</b>	Welch		1137,51	2	3926,34	0,00**
	Brown-Forsythe	1112,65		2	5820,77	0,00**

\*\* p ≤ 0,01

La aplicación de la prueba de Games-Howell (Tabla 17) indicó que en todos los ciclos, las medias de las temperaturas en la zona animal fueron todas diferentes y muy significativas ( $p < 0,01$ ) para el período crítico, postcrítico y final. Dado que en ninguna de las tres comparaciones se encuentra el 0 entre los límites del intervalo de confianza, se rechaza de nuevo la igualdad de medias.

**Tabla 17. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para la temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) en período crítico, post-crítico y final para cada ciclo.**

Ciclo	Período	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo de confianza	
					L.I	L.S
<b>I</b>	Crítico-Post-crítico	0,39	0,02	0,00**	0,33	0,43
	Crítico-Final	1,60	0,03	0,00**	1,53	1,67
	Post-crítico-Final	1,22	0,02	0,00**	1,17	1,27
<b>II</b>	Crítico-Post-crítico	0,41	0,02	0,00**	0,37	0,45
	Crítico-final	1,31	0,02	0,00**	1,26	1,37
	Post-crítico-Final	0,91	0,02	0,00**	0,86	0,96
<b>III</b>	Crítico-Post-crítico	1,42	0,02	0,00**	1,36	1,47
	Crítico-final	2,47	0,02	0,00**	2,41	2,52
	Post-crítico-Final	1,05	0,03	0,00**	0,99	1,11
<b>IV</b>	Crítico-Post-crítico	1,18	0,03	0,00**	1,12	1,25
	Crítico-final	1,64	0,04	0,00**	1,53	1,74
	Post-crítico-Final	0,45	0,05	0,00**	0,34	0,56
<b>V</b>	Crítico-Post-crítico	0,95	0,02	0,00**	0,89	1,00
	Crítico-Final	1,77	0,05	0,00**	1,65	1,89
	Post-crítico-Final	0,82	0,05	0,00**	0,71	0,94
<b>VI</b>	Crítico-Post-crítico	0,52	0,05	0,00**	0,40	0,64
	Crítico-Final	2,59	0,03	0,00**	2,51	2,68
	Post-crítico-Final	2,07	0,05	0,00**	1,96	2,19
<b>VII</b>	Crítico-Post-crítico	1,15	0,05	0,00**	1,03	1,27
	Crítico-Final	2,34	0,05	0,00**	2,22	2,46
	Post-crítico-Final	1,19	0,05	0,00**	1,08	1,30

\*\*  $p \leq 0,01$ .

En la Figura 29 se observa como la temperatura en la zona animal disminuye a medida que avanza el ciclo siendo máxima en el período crítico y mínima en el período final.

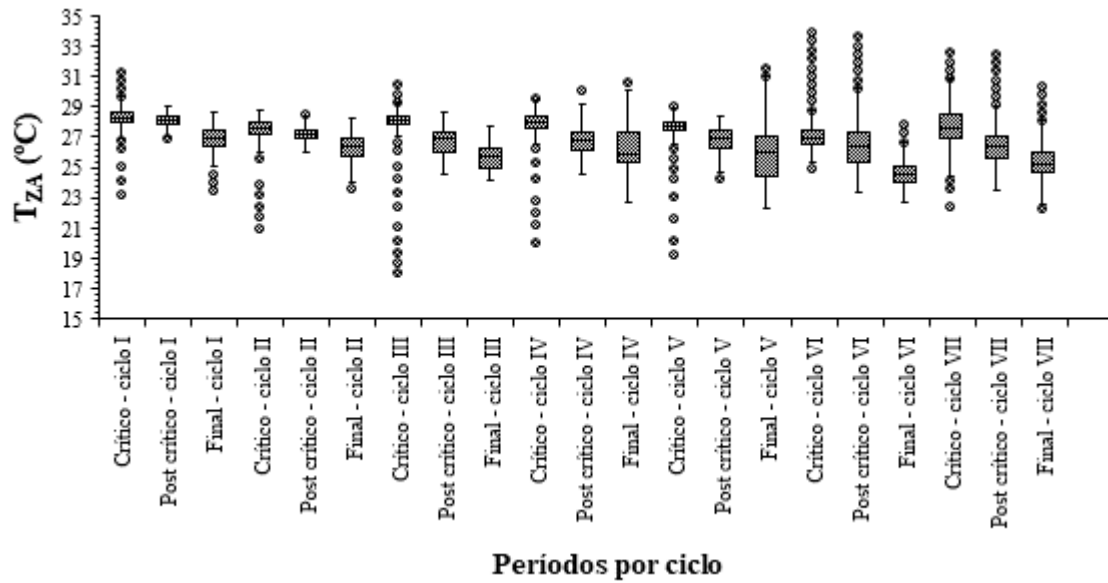


Figura 29. Temperatura media en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) para los períodos crítico, post-crítico y final para cada ciclo.

### 5.1.1.3 Distribución de la temperatura en el alojamiento

La temperatura en el interior del alojamiento sufre variaciones tanto en altura como longitudinal y transversalmente.

#### *Distribución en altura y transversal*

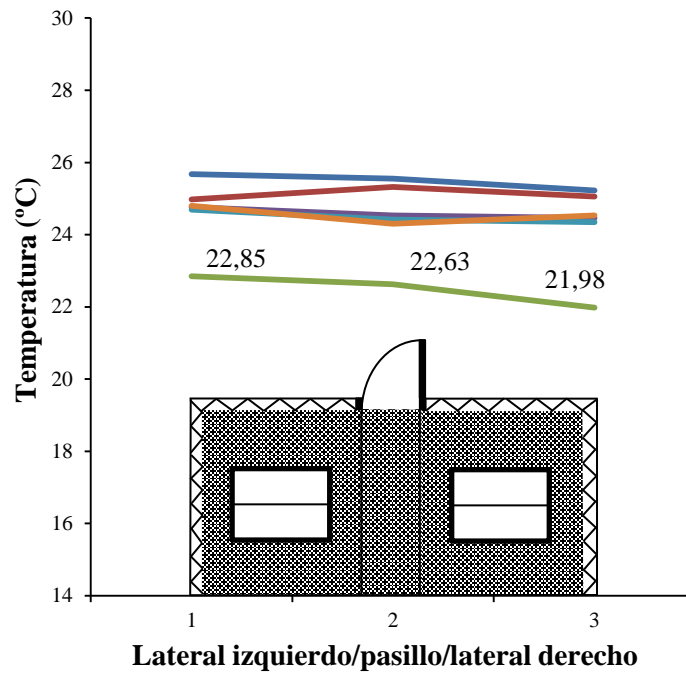
Analizando el perfil de temperaturas en altura (Tabla 18) se comprueba que, a nivel del emparrillado, donde se encuentra emplazado el foco calefactor, la temperatura media de los ciclos analizados es  $0,23^{\circ}\text{C}$  superior a la registrada por la sonda situada a 1 m de altura, la cual, a su vez, es  $0,51^{\circ}\text{C}$  inferior a la temperatura situada a 2 m de altura, que va a ser la zona donde se almacena el aire cálido. Este comportamiento se experimentó en todos los ciclos analizados, obteniendo diferencias máximas de  $0,64^{\circ}\text{C}$  entre la temperatura a nivel del suelo y a 1 m y de  $0,53^{\circ}\text{C}$  entre las temperaturas a 1 y 2 m.

**Tabla 18. Distribución en altura de la temperatura a 0 metros ( $T_{A10}$ ), a 1 metro ( $T_{A7}$ ) y a 2 metros ( $T_{A13}$ ) por ciclo.**

Ciclo	Temperatura			Diferencia de temperatura		
	$T_{A10}$	$T_{A7}$	$T_{A13}$	$\frac{T_{A10}-T_{A7}}{T_{A7}}$	$T_{A10}-T_{A13}$	$\frac{T_{A7}-T_{A13}}{T_{A13}}$
I	26,11	26,65	27,13	-0,54	-1,02	-0,48
II	26,24	26,06	26,49	0,18	-0,25	-0,43
III	25,63	24,99	25,52	<b>0,64</b>	0,11	<b>-0,53</b>
IV*	-	-	-	-	-	-
V	26,32	26,21	26,68	0,11	-0,36	-0,47
VI	26,08	26,09	26,50	-0,01	-0,42	-0,41
<b>Total</b>	26,12	25,89	26,40	0,23	-0,28	-0,51

\* Pérdida de datos, no hay medición.

Por lo que respecta a la variación transversal (Figura 30) apenas se observan variaciones, produciéndose las temperaturas mínimas en el centro del pasillo. Las máximas diferencias de temperatura en el centro de los corrales situados a ambos lados del pasillo y del centro del pasillo de 0,87°C (Figura 30).



**Figura 30. Distribución transversal de la temperatura en la sala para: I (—), II (—), III (—), IV (—), V (—) y VI (—).**

*Distribución longitudinal*

La temperatura en el alojamiento sufre variaciones fundamentalmente longitudinales debido a la dinámica de flujos de aire que se establece desde la entrada de aire hasta su salida forzada a través del ventilador. La Figura 31 muestra la variación longitudinal de la temperatura basada en la media de las temperaturas medidas para cada ciclo en cada corral a un metro de altura sobre el emparrillado. Las temperaturas más altas afectan a los corrales centrales mientras que las temperaturas más bajas afectan a los corrales localizados en la entrada y salida del aire, representada a la izquierda y a la derecha de la Figura 31, respectivamente, con diferencias entre 3,02 (ciclo VI) y 2,90°C (ciclo III).

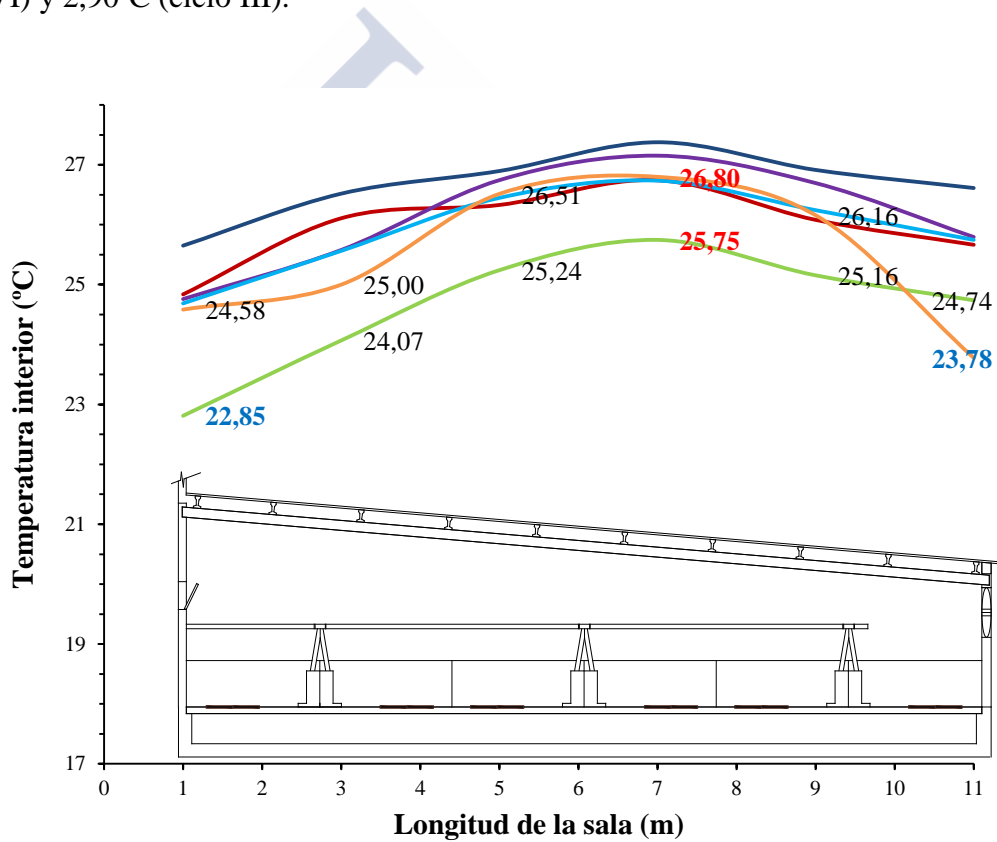


Figura 31. Perfil de temperatura en los ciclos: I (-), II (-), III (-), IV (-), V (-) y VI (-).

5.1.1.4 Estimación de la temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) en base a mediciones indirectas

La ubicación de sensores en la zona animal resulta difícil debido a las agresiones que sufren por parte de los lechones. Por ello resulta interesante conocer el valor de esta

temperatura a partir de mediciones realizadas en otras ubicaciones de la sonda de control. La relación entre la temperatura en la zona animal, medida en el corral 4 a 0,40 m de altura, y la temperatura de ese corral a 1 m de altura es lineal con un  $R^2$  de 0,83 (Figura 32).

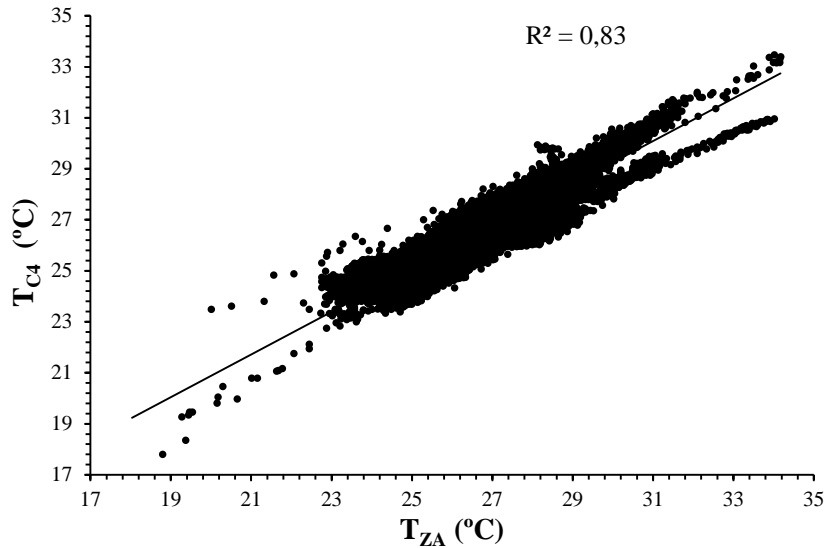


Figura 32. Relación lineal entre las temperaturas a 1 m de altura en el corral 4 y en la zona animal ( $T_{ZA}$ ).

Obteniéndose la siguiente ecuación:

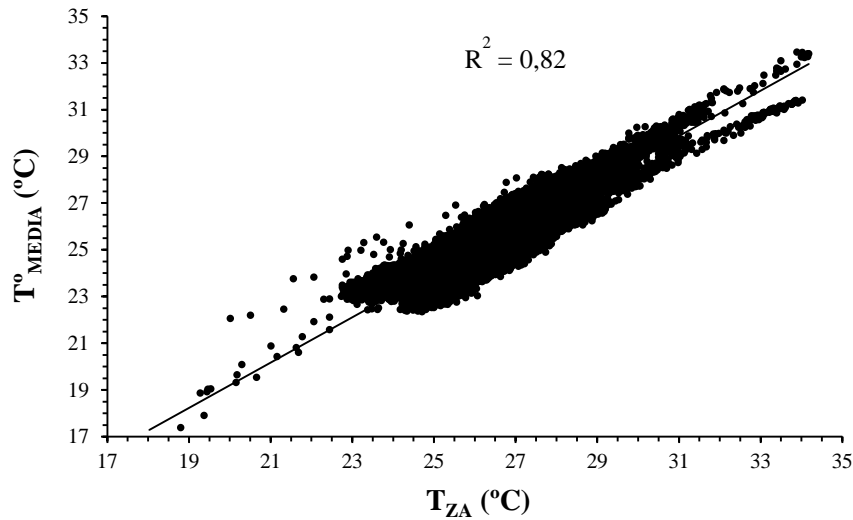
$$y = 0,837x + 4,1394 \quad [EC.28]$$

Donde:

$y$  = temperatura en el corral 4 (°C)

$x$  = temperatura en la zona animal (°C)

La aproximación lineal indica que, hasta 26°C, la temperatura en la zona animal es menor que la temperatura a 1 m, mientras que la tendencia se invierte a mayores temperaturas. La relación entre la temperatura animal y la temperatura media a 1 m, calculada teniendo en cuenta los corrales 1 a 6, es lineal con un  $R^2$  de 0,82. En este caso la temperatura de la zona animal es siempre mayor que la temperatura media a 1 m (Figura 33) incrementándose la diferencia a medida que aumentan las temperaturas, con una diferencia media de 1°C.



**Figura 33. Relación lineal entre la temperatura media de los 6 corrales y la temperatura en la zona animal ( $T_{ZA}$ ).**

Obteniéndose la ecuación:

$$y = 0,9701x + 0,2048 \quad [\text{EC. 29}]$$

Donde:

$y$  = temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ )

$x$  = temperatura en la zona animal ( $^{\circ}\text{C}$ )

En vista de estos resultados (Figura 31), la ubicación óptima de la sonda de temperatura para el equipo de control está entre 3,43 m desde el origen, en la segunda mitad del segundo corral, ya que es donde se mide la temperatura más próxima a la media del local. Sin embargo, en el ensayo experimental, el sensor se situaba a 1 m sobre el emparrillado en la zona central del corral número 4 (a 7 m de la entrada de aire), donde las temperaturas fueron más elevadas. La relación existente entre este valor y el valor de la temperatura media es lineal con un  $R^2$  de 0,96 (Figura 34).

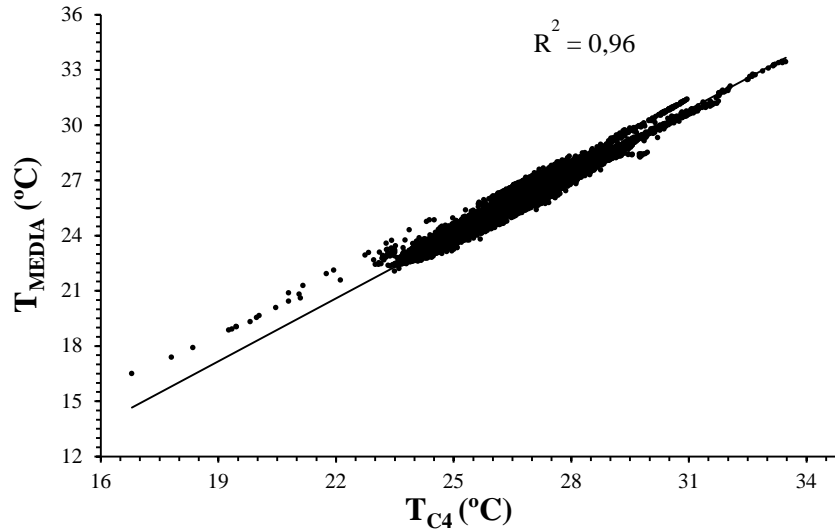


Figura 34. Relación lineal entre la temperatura media y la temperatura en el box 4 ( $T_{C4}$ ).

Obteniéndose la ecuación:

$$y = 1,1397x - 4,4839 \quad [EC.30]$$

Donde:

$y$  = temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ )

$x$  = temperatura en el corral 4 ( $^{\circ}\text{C}$ )

Basándonos en que las relaciones entre las temperaturas medidas a 1 m de altura y su media son todas lineales con valores de  $R^2$  comprendidos entre 0,88 (a 11 m de la entrada de aire) y 0,97 (a 3 m) (

Figura A-13 apéndice), es posible obtener la variación longitudinal de temperaturas a partir de la temperatura media del local. La relación de las pendientes y los términos independientes de las rectas obtenidas en función de la distancia a la entrada de aire se muestran en la Figura 35.

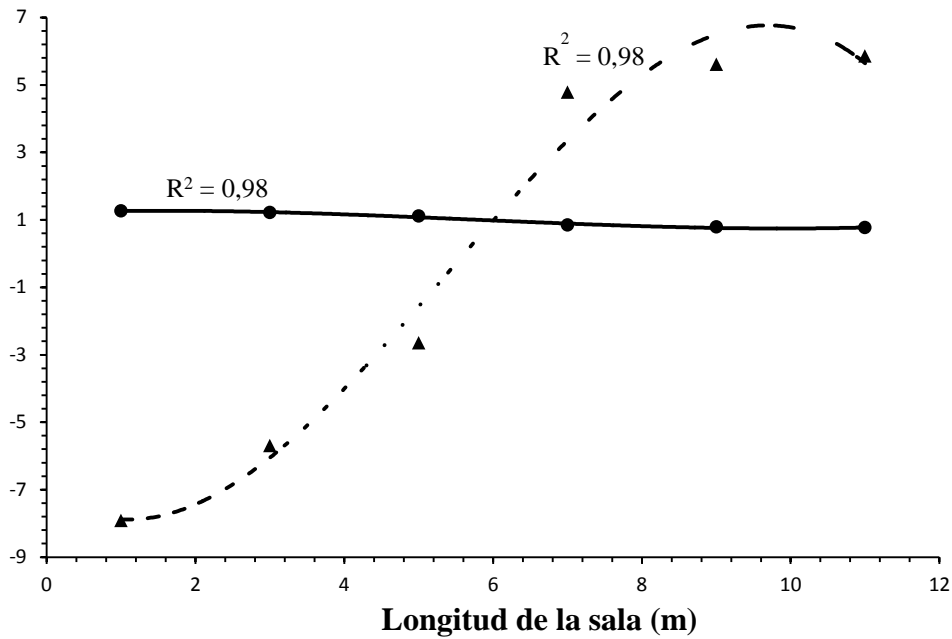


Figura 35. Valores de la pendiente (—) y del término independiente (- -) de las rectas que relacionan las temperaturas a 1 m de altura sobre cada corral con su temperatura media.

Las ecuaciones de las rectas obtenidas en función de la distancia a la entrada de aire son:

$$y_1 = -0,00463x_1^3 + 0,7489x_1^2 - 1,483x_1 - 7,0963 \quad [\text{EC.31}]$$

Donde:

$y_1$  = distancia al origen (m)

$x_1$  = pendiente

$$y_2 = -0,0018x_2^3 + 0,0314x_2^2 - 0,0851x_2 - 1,2081 \quad [\text{EC.32}]$$

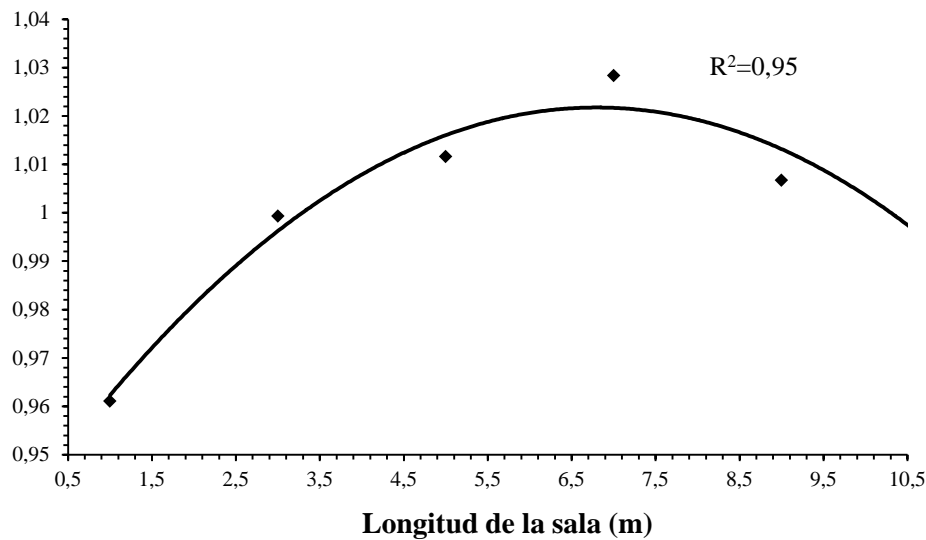
Donde:

$y_2$  = distancia al origen (m)

$x_2$  = término independiente

Se puede observar que las ecuaciones obtenidas (Figura 35), aunque muestran valores de  $R^2$  elevados (0,98 para  $y_1$  y  $y_2$  respectivamente) son de tercer grado. Además la ecuación correspondiente a términos independientes presenta dificultades para representar la variación de los términos independientes en función de la distancia, muy acentuada hasta la distancia 7 m y muy suave posteriormente. Además, el valor medio

de los términos independientes obtenidos para las temperaturas estudiadas es 0. En consecuencia, se opta por modificar las rectas que relacionan las temperaturas medidas a 1 m de altura y su media forzando a 0 su término independiente. La nueva ecuación que relaciona las pendientes se muestra en la Figura 36:



**Figura 36. Valores de la pendiente de las rectas con término independiente nulo que relacionan las temperaturas a 1 m de altura sobre cada corral con su temperatura media.**

Obteniéndose la ecuación:

$$y = -0,0018x^2 - 0,0241x - 0,94 \quad [EC.33]$$

Donde:

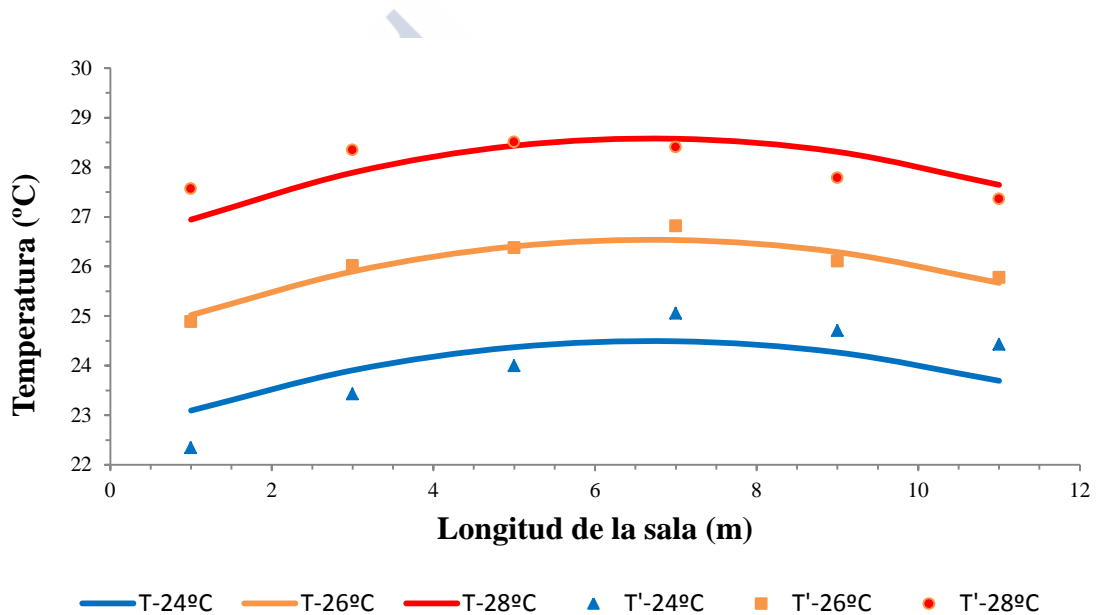
y = distancia (m)

x = pendiente

La validación de la ecuación obtenida para la estimación de las temperaturas en el local a partir de la distancia de ubicación de la sonda con respecto de la entrada de aire se hizo para temperaturas medias del local entre 23 y 28 °C así como para el conjunto de todas estas temperaturas. La mejor estimación se obtiene a 5 metros desde la entrada de aire y para la temperatura de 26°C (Figura 37). Si la validación de la simulación se hace para el conjunto de temperaturas comprendidas entre 23 y 28 °C, se obtiene un error medio de 0,03°C, un error medio absoluto porcentual de 0,07% y un coeficiente R<sup>2</sup> de 0,94, para una función parabólica. (Tabla 19).

**Tabla 19. Error medio (EM), desviación típica del error (SDerror), raíz del error cuadrático medio (RECM), error medio absoluto porcentual (EMAP) y coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>) de la validación de la simulación para las temperaturas comprendidas entre 23 y 28°C.**

T <sub>media</sub> °C	EM	SDerror	RECM	EMAP	R <sup>2</sup>
23	0,03	0,66	0,66	0,00	0,69
24	0,03	0,57	0,57	0,03	0,68
25	0,03	0,35	0,36	0,08	0,83
26	0,03	0,16	0,16	0,11	0,94
27	0,03	0,32	0,33	0,12	0,64
28	0,03	0,40	0,41	0,11	0,48
<b>Total</b>	0,03	0,44	0,45	0,07	0,94



**Figura 37. Temperaturas longitudinales medidas para las temperaturas medias de 24 (+), 26 (+) y 28°C (+) y temperaturas longitudinales estimadas para las temperaturas medias de 24 (-), 26 (-) y 28°C (-) en función de la distancia a la entrada de aire.**

Las ecuaciones de las rectas obtenidas en función de la distancia a la entrada de aire son:

$$y_1 = -0,0504x_1^2 - 0,6748x_1 - 26,32 \quad [EC.34]$$

Donde:

$y_1$  = temperatura (°C) (Para T<sup>a</sup> 28°C)

$x_1$  = distancia (m)

$$y_2 = -0,0517x_2^2 - 0,6941x_2 - 24,3 \quad [EC.35]$$

Donde:

$y_2$  = temperatura (°C) (Para T<sup>a</sup> 26°C)

$x_2$  = distancia (m)

$$y_3 = -0,0432x_3^2 - 0,5784x_3 - 22,56 \quad [\text{EC.36}]$$

Donde:

$y_3$  = temperatura (°C) (Para T<sup>a</sup> 24°C)

$x_3$  = distancia (m)

#### 5.1.1.5 Evolución de la humedad relativa durante los 7 ciclos estudiados

La Tabla 20 muestra los valores medios, máximos y mínimos para la humedad relativa en la zona animal y en el exterior para cada ciclo. Solamente en los ciclos I y VII la humedad tuvo un buen comportamiento con valores medios de 54.9 y 60,3%, permaneciendo entre los valores recomendados por Forcada *et al.* (2009), el 50 y el 75%, durante un 79.4 y un 91.3% del tiempo respectivamente.

El resto de los ciclos están saturados o muy próximos a la saturación. Los valores de humedad obtenidos en la zona animal son globalmente mayores que en la zona de la salida del aire, lo cual puede ser debido a que el sensor se halla en la zona de exhalación de los animales. La humedad exterior es inferior a la humedad obtenida en el interior del alojamiento, presentando además mayor variabilidad.

**Tabla 20. Evolución del valor medio (Med.), máximo (Máx.) y mínimo (Mín.) de la humedad relativa exterior ( $HR_{EXT}$ ), humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y de la humedad en la salida exterior del aire ( $HR_S$ ), porcentaje del tiempo en el que la humedad en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ) no excede los valores recomendados, 50-75%, (Forcada *et al.*, 2009) en cada ciclo (% V.C), porcentaje de tiempo en el que la humedad en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ) excede el 80% ( $t > 80\%$ ) y porcentaje de tiempo en el que la humedad en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ) es inferior al 40% ( $t < 40\%$ ).**

Ciclo	$HR_{EXT}$			$HR_{ZA}$						$HR_S$		
	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	% V.C	%t >80%	%t <40%	Med.	Máx.	Mín.
I	79,20	97,50	21,30	54,90	81,30	29,20	79,40	0,00	4,30	62,80	81,50	34,20
II	90,90	98,30	27,20	88,70	100,00	55,50	25,00	72,90	0,00	71,40	92,50	49,10
III	84,90	98,40	35,50	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	98,30	100,00	75,20
IV	68,40	97,30	18,40	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	87,30	100,00	44,10
V	86,20	98,00	29,10	100,00	100,00	100,00	0,00	100,00	0,00	100,00	100,00	100,00
VI	83,70	97,40	32,30									
VII	82,20	97,20	34,00	60,30	84,80	38,80	91,30	0,10	0,10			

Globalmente, no hay una fuerte relación positiva entre la humedad relativa interior y exterior. Esto sucede, porque se alcanza la saturación por largos periodos durante los ciclos. En los ciclos donde no hubo saturación, los valores de  $R^2$  en cuanto a humedad relativa interior y en la zona animal, están en torno a 0,5 (0,495 para el ciclo I y 0,564 para el ciclo VII), de acuerdo con los resultados obtenidos por Banhazi *et al.* (2008c), con valores de  $R^2$  de 0,55. Además durante los ciclos mencionados (I y VII), los valores  $R^2$  entre la temperatura y la humedad en la zona animal están por encima de 0,50, lo que sugiere que un gran porcentaje de variación de la humedad del aire puede ser explicada si la comparamos con la temperatura, ya que la temperatura modifica en el contenido de humedad relativa del aire y su capacidad de retención de agua. Esto indica que es más fácil controlar la temperatura del aire que los niveles de humedad relativa (Van Wagenberg, 2005). Del mismo modo, los resultados muestran que el mantenimiento de unas buenas condiciones ambientales en las instalaciones de granjas de porcino es difícil con la actual estrategia de control de la temperatura, la cual no logra un rendimiento eficiente en el mantenimiento de un nivel adecuado de humedad relativa. Sin embargo, la humedad del aire no se espera que tenga mucha influencia sobre los lechones destetados mantenidos dentro de la zona termoneutra (Kamada y Notsuki, 1987). Guo *et al.* (2001) aplicaron dos estrategias de control del clima en una explotación porcina: una basada en el control de la temperatura y otra basada en el control de la temperatura y la humedad. El resultado obtenido mostró que, en climas fríos, el rendimiento de los

cerdos no se ve afectado por las estrategias de control aplicadas. Esto se confirma en el ensayo realizado, ya que, en los ciclos saturados III y V, se obtuvieron las ganancias medias diarias máxima y mínima respectivamente (Figura 23Figura 24).

La

Tabla 21 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch. Puesto que, en ambos, el p-valor es menor que 0,05 se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la humedad relativa en la zona animal de los grupos comparados no son iguales.

**Tabla 21. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadístico de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos ( $gl1$ ), grados de libertad intra-grupos corregidos ( $gl2$ ) y nivel crítico (Sig.) para la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

	$W_2$	$t_1$	$gl1$	$gl2$	Sig.
Welch		2685,12	2	5046,38	0,00**
Brown-Forsythe	3683,22		2	5776,66	0,00**

\*\* $p \leq 0,01$ .

La aplicación de la prueba de Games-Howell (Tabla 22) indicó que en todos los ciclos, las medias de la  $HR_{ZA}$  fueron todas diferentes y muy significativas ( $p < 0,01$ ). Estos resultados son muestra de que la humedad relativa en el interior del alojamiento está afectada por la estación, pero no muestran un patrón estacional claro lo cual puede ser observado en la Figura 38.

**Tabla 22. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

Ciclos	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo de confianza	
				L.I	L.S
II-I	16,56	0,23	0,00**	16,03	17,09
II-VII	13,71	0,24	0,00**	13,16	14,27
VII-I	2,85	0,15	0,00**	2,49	3,21

\*\* $p \leq 0,01$ .

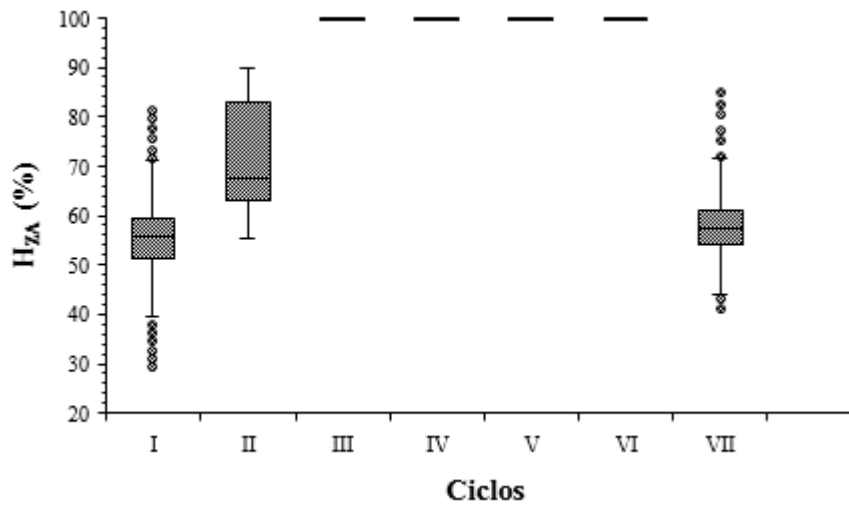


Figura 38. Humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) para cada uno de los ciclos.

La evolución de los valores medios de HR a lo largo de los tres períodos se muestra en la Tabla 23, tanto para la zona animal como para la salida de aire exterior. Excepto en los ciclos saturados, en todos los casos se observa un aumento de la humedad a medida que avanza el ciclo como consecuencia del aumento de peso de los animales. El incremento del número de renovaciones de aire no es capaz de compensar la mayor producción de agua que pasa al ambiente debida a crecimiento de los animales.

Tabla 23. Evolución del valor medio de la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y de la humedad en la salida exterior del aire ( $HR_S$ ) para los períodos crítico, post-crítico y final.

Ciclo	$HR_{ZA}$			$HR_S$		
	Crítico	Post-crítico	Final	Crítico	Post-crítico	Final
I	51,90	54,20	59,00	59,00	63,80	65,80
II	75,90	89,20	100,00	57,40	68,50	70,50
III	100,00	100,00	100,00	94,90	100,00	100,00
IV	100,00	100,00	100,00	72,50	93,80	100,00
V	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
VI						
VII	57,50	58,40	64,70			

La Tabla 24 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch, ambos muestran el p-valor menor que 0,05, por lo tanto se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la temperatura media en la zona animal de los grupos comparados no son iguales.

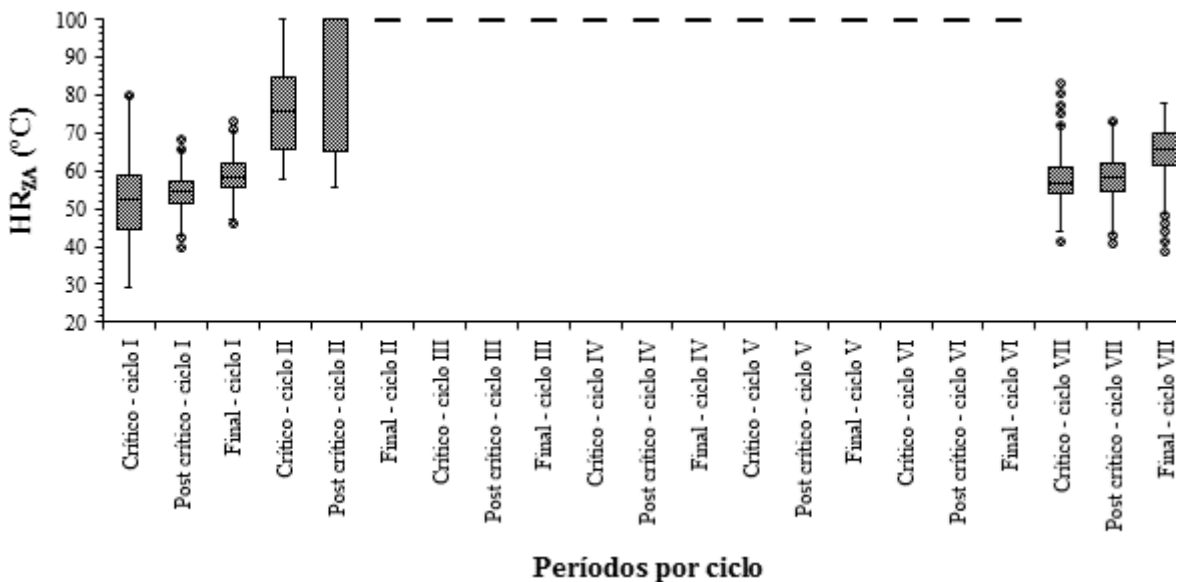
**Tabla 24. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadístico de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos ( $gl_1$ ), grados de libertad intra-grupos corregidos ( $gl_2$ ) y nivel crítico (Sig.) para la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) en período crítico, post-crítico y final para cada ciclo comparado.**

Ciclo	Prueba	$W_2$	$t_1$	$gl_1$	$gl_2$	Sig.
I	Welch		671,36	2	3777,12	0,00**
	Brown-Forsythe	571,84		2	4321,91	0,00**
II	Welch					
	Brown-Forsythe				*	
VII	Welch		809,45	2	4119,40	0,00**
	Brown-Forsythe	822,69		2	6183,70	0,00**

\* Las pruebas robustas de igualdad de medias no se pueden realizar para el ciclo II porque como mínimo, un grupo tiene varianza 0.

\*\*  $p \leq 0,01$

En la Figura 39, se observa como la  $HR_{ZA}$  en la zona animal aumenta a medida que avanza el ciclo siendo menor el período crítico y máxima en el período final. (Salvo en los ciclos saturados o próximos a saturación).



**Figura 39. Humedad relativa en la zona animal ( $HR_{ZA}$ ) para los períodos crítico, post-crítico y final para cada ciclo.**

La aplicación de la prueba de Games-Howell (Tabla 25) indicó que en todos los ciclos, las medias de las HR fueron todas diferentes y muy significativas ( $p < 0,01$ ) para el período crítico, postcrítico y final. Los límites del intervalo de confianza permiten conocer que la diferencia se encuentra entre el límite superior e inferior, y en ninguna de las tres comparaciones se encuentra el 0, lo que permite, de nuevo, rechazar la igualdad de medias. Se puede concluir que el período de crecimiento de los animales afecta de forma significativa a las humedades relativas obtenidas.

**Tabla 25. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para la HR en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) en período crítico, post-crítico y final para cada ciclo comparado.**

Ciclo	Período	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo de confianza	
					L.I	L.S
I	Post-crítico – Crítico	2,32	0,23	0,00**	1,77	2,86
	Final –Crítico	7,12	0,24	0,00**	6,57	7,67
	Final –Post-crítico	4,80	0,16	0,00**	4,43	5,18
II	Post-crítico – Crítico	13,30	0,46	0,00**	12,23	14,38
	Final –Crítico	24,08	0,24	0,00**	23,51	24,64
	Final –Post-crítico	10,77	0,39	0,00**	9,86	11,69
VII	Post-crítico– Crítico	0,80	0,20	0,00**	0,34	1,26
	final– Crítico	7,16	0,20	0,00**	6,70	7,62
	Final –Post-crítico	6,36	0,20	0,00**	5,90	6,82

\*\*  
p ≤ 0,01.

#### 5.1.1.6 Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> durante los 7 ciclos estudiados

La Tabla 26 muestra la media, máxima y mínima concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y en la salida de aire ( $C_{CO_2-S}$ ) para cada ciclo. Los datos recogidos en la salida de aire son indicativos de las emisiones de CO<sub>2</sub> de la granja hacia la atmósfera.

**Tabla 26. Evolución del valor medio (Med.), máximo (Máx.) y mínimo (Mín.) de concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y CO<sub>2</sub> en la salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ), y porcentaje de tiempo (%t) durante el cual los valores recomendados son superados en cada ciclo según CIRG (1999) y Lee *et al.* (2005).**

Ciclo	$C_{CO_2-ZA}$ (ppm)			$C_{CO_2-S}$ (ppm)				
	Med.	Máx.	Mín.	%t $C_{CO_2} > 3000$	Med.	Máx.	Mín.	%t $C_{CO_2} > 3000$
<b>I</b>	1957,82	3752,00	599,60	0,56	1886,43	3033,20	513,70	0,02
<b>II</b>	2661,81	>5000	658,20	22,09	2504,76	>5000	589,80	14,11
<b>III</b>	2798,77	>5000	888,70	22,44				
<b>IV</b>	2531,83	>5000	1080,10	22,54	1850,58	>5000	607,40	6,42
<b>V</b>	2239,53	>5000	775,40	12,95	1731,18	>5000	339,80	9,09
<b>VI</b>	1566,52	>5000	898,40	1,08	889,45	1548,80	343,70	0,00
<b>VII</b>	980,63	>5000	500,00	0,26	1498,02	>5000	365,20	4,45

En general, las  $C_{CO_2}$  son más altas en la zona animal que en la salida del aire debido a la acumulación de CO<sub>2</sub> que se produce en la capas inferiores donde son ubicados los sensores, a una altura de 0,40 m (sensor de la zona animal) y 2,10 m (sensor en la salida del aire). Para todos los ciclos, la  $C_{CO_2}$  media en la zona animal está por debajo de las 3000 ppm, valor recomendado por el CIRG (1999) y Lee *et al.* (2005), pero excediendo las 1540 ppm propuestas por Donham (1991), excepto para el ciclo VII.

En todos los ciclos, excepto el ciclo I, los valores máximos están por encima de las 5000 ppm, valor límite superior en el rango del sensor.

Sin embargo, mientras que durante los ciclos II, III y IV (desde el 21 de Noviembre, al 4 de Abril de 2012) el valor umbral de 3000 ppm es superado el 22% del tiempo, durante los ciclos I, V, VI y VII la proporción de tiempo en el que excede las 3000 ppm decrece considerablemente, con un valor del 13% para el ciclo V (desde el 4 de Abril, al 21 de Mayo de 2012) y valores entorno al 1% y por debajo, para los ciclos de verano.

La  $C_{CO_2}$  está relacionada con la estación, la humedad relativa, el sistema de ventilación y el peso de los animales. Las  $C_{CO_2}$  más altas se corresponden con las estaciones más frías y los valores más bajos con las estaciones cálidas y está

directamente relacionado con el funcionamiento del sistema de ventilación, el cual disminuye durante los períodos más fríos, 931-1082 MJ por ciclo, y se incrementa hasta 1254-1415 MJ durante los ciclos más cálidos. En los ciclos saturados o próximos a la saturación (II-V) con flujo de ventilación entre 0,23 y 0,45 m<sup>3</sup>/s, la  $C_{CO_2}$  es directamente proporcional al peso final de los animales. Sin embargo, como consecuencia de las altas temperaturas exteriores en verano, los notables incrementos en el caudal de aire extraído hasta 0,9 m<sup>3</sup>/s, provocan una extracción eficaz del  $C_{CO_2}$ , sin que su concentración se vea influenciada por el peso de los mismos.

La Tabla 27 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch para la concentración de CO<sub>2</sub> por ciclo. Ambos, el p-valor es menor que 0,05 se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la  $C_{CO_2-ZA}$  de los distintos ciclos no son iguales.

**Tabla 27. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadístico de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos (gl1), grados de libertad intra-grupos corregidos (gl2) y nivel crítico (Sig.) para la concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

	$W_2$	$t_1$	gl1	gl2	Sig.
<b>Welch</b>		11999,74	6	17395,72	0,00**
<b>Brown-Forsythe</b>	6256,27		6	29850,84	0,00**

\*\*  $p \leq 0,01$ .

La aplicación de la prueba de Games-Howell (Tabla 28) indicó que en todos los ciclos, las medias de la  $C_{CO_2-ZA}$  fueron todas diferentes y muy significativas ( $p < 0,01$ ).

**Tabla 28. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) entre los ciclos comparados.**

Ciclos	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo confianza	
				L.I	L.S
II-I	589,14	11,26	0,00**	555,94	622,34
III-I	753,43	9,94	0,00**	724,13	782,73
III-V	584,28	13,11	0,00**	545,62	622,95
IV-I	526,38	11,76	0,00**	491,70	561,06
V-I	169,14	11,51	0,00**	135,19	203,10
I-VI	400,68	7,68	0,00**	378,02	423,34
I-VII	980,78	6,51	0,00**	961,59	999,96
III-II	164,29	12,89	0,00**	126,28	202,30
II-V	421,00	14,14	0,00**	378,30	461,70
II-VI	989,82	11,25	0,00**	956,65	1022,98
II-VII	1569,92	10,48	0,00**	1539,02	1600,82
III-VI	1154,11	9,92	0,00**	1124,85	1183,36
III-VII	1734,20	9,04	0,00**	1707,55	1760,86
II-IV	62,76	14,34	0,00**	20,46	105,05
III-IV	227,05	13,33	0,00**	187,74	266,35
IV-V	357,24	14,54	0,00**	314,35	400,13
IV-VI	927,06	11,75	0,00**	892,42	961,71
IV-VII	1507,16	11,01	0,00**	1474,68	1539,64
V-VI	569,82	11,50	0,00**	535,91	603,74
V-VII	1149,92	10,75	0,00**	1118,22	1181,62

\*\* $p \leq 0,01$ .

En la Figura 40 se observa una evolución senoidal anual (de Octubre de 2011 a Agosto de 2012) de los valores de  $C_{CO_2-ZA}$  en los 7 ciclos analizados, correspondiéndose con una variación estacional. Estos resultados están de acuerdo con los resultados obtenidos por Banhazi *et al.* (2008a, 2011), que observaron variaciones estacionales en la  $C_{CO_2}$  dentro del alojamiento. De hecho, se ha hallado una fuerte relación lineal entre los valores medios por ciclo de la  $C_{CO_2}$  en la zona animal y de temperatura exterior, con un  $R^2$  de 0,91.

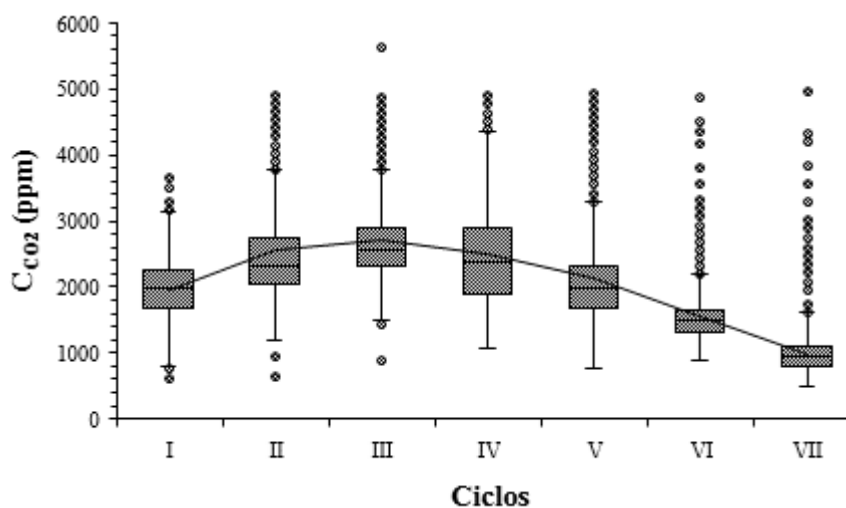
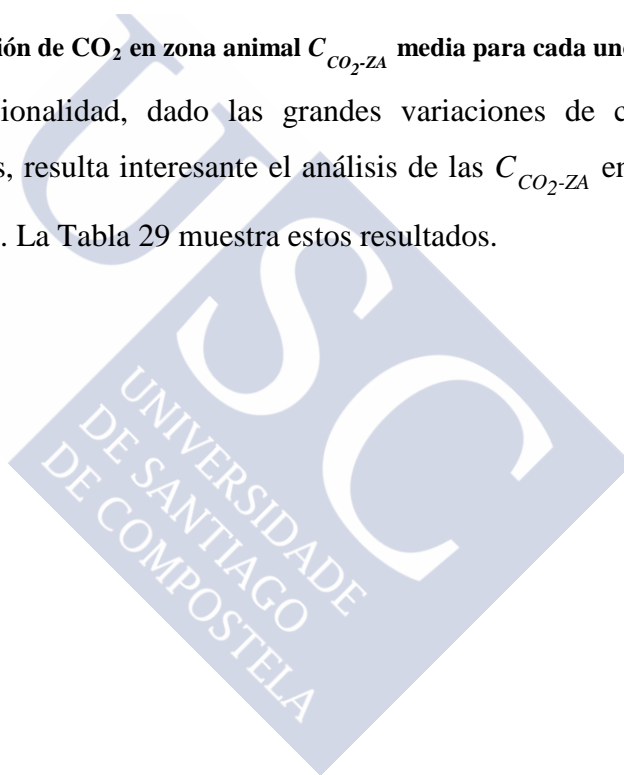


Figura 40. Concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal  $C_{CO_2-ZA}$  media para cada uno de los ciclos.

Además de la estacionalidad, dado las grandes variaciones de crecimiento y desarrollo de los animales, resulta interesante el análisis de las  $C_{CO_2-ZA}$  en los períodos crítico, post-crítico y final. La Tabla 29 muestra estos resultados.



**Tabla 29. Evolución del valor medio de concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y en la salida del aire ( $C_{CO_2-S}$ ) para los períodos crítico, post-crítico y final de cada ciclo.**

Ciclo	$C_{CO_2-ZA}$ (ppm)			$C_{CO_2-S}$ (ppm)		
	Crítico	Post-crítico	Final	Crítico	Post-crítico	Final
<b>I</b>	1602,94	2137,26	2146,85	1566,04	2092,81	2009,27
<b>II</b>	3021,93	2369,65	2598,37	3096,71	2300,83	2142,60
<b>III</b>	3323,78	2477,86	2594,66	2371,35	1753,93	1190,83
<b>IV</b>	3115,38	2376,88	1865,10			
<b>V</b>	3017,20	1973,49	1587,63	2489,93	1495,31	1064,97
<b>VI</b>	1469,78	1469,55	1774,96	902,18	892,60	872,38
<b>VII</b>	949,41	996,03	995,34	1973,79	1298,84	1204,02

Si bien, la tendencia en las temperaturas es el ascenso a medida que avanza el ciclo, en el caso de la  $C_{CO_2}$ , el comportamiento es más errático. Los ciclos saturados o próximos a la saturación (II-V) presentan altos valores de  $C_{CO_2-ZA}$  (>3000 ppm) durante el período crítico, descendiendo durante el período post-crítico. A partir de ahí se diferencian dos comportamientos durante el período final, aumento de la concentración en los ciclos II y III y disminución en los ciclos III y IV, con menores ganancias medias diarias (0,25 y 0,26 Kg/día). Por tanto, nuevamente queda patente la relación entre el peso del animal y la  $C_{CO_2}$ . En cuanto a los ciclos no saturados, la  $C_{CO_2-ZA}$  tiende a aumentar a medida que avanza el ciclo, aunque con distintos patrones. Estos resultados ponen de manifiesto el distinto comportamiento de la  $C_{CO_2-ZA}$  ante las variaciones de la HR.

La Tabla 30 ofrece los estadísticos de Brown-Forsythe y de Welch. Puesto que, en ambos, el p-valor es menor que 0,05 se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias y concluir que la concentración de CO<sub>2</sub> entre los distintos periodos no es igual.

**Tabla 30. Pruebas robustas de igualdad de medias: estadístico de Welch ( $t_1$ ) y Brown-Forsythe ( $W_2$ ), grados de libertad inter-grupos (gl1), grados de libertad intra-grupos corregidos (gl2) y nivel crítico (Sig.) para la concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) entre los periodos crítico, postcrítico y final.**

Ciclo	Prueba	$W_2$	$t_1$	gl1	gl2	Sig.
<b>I</b>	Welch		1712,69	2	3895,80	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	1750,05		2	5777,66	0,00 <sup>**</sup>
<b>II</b>	Welch		431,67	2	3800,67	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	565,52		2	4503,52	0,00 <sup>**</sup>
<b>III</b>	Welch		387,94	2	3486,35	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	585,77		2	3011,37	0,00 <sup>**</sup>
<b>IV</b>	Welch		1667,89	2	3354,77	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	1708,33		2	4405,44	0,00 <sup>**</sup>
<b>V</b>	Welch		1669,74	2	3230,26	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	1923,52		2	2730,64	0,00 <sup>**</sup>
<b>VI</b>	Welch		187,63	2	3578,49	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	297,91		2	3285,06	0,00 <sup>**</sup>
<b>VII</b>	Welch		17,78	2	4101,65	0,00 <sup>**</sup>
	Brown-Forsythe	17,41		2	6054,06	0,00 <sup>**</sup>

<sup>\*\*</sup>p ≤ 0,01.

Para profundizar en el análisis, se realizó un test de comparaciones dos a dos de Games-Howell (Tabla 31) en el que se obtuvo que para los ciclos II-V todas las medias de los distintos periodos fueron diferentes. En el resto de los ciclos solo se encontraron igualdades en la  $C_{CO_2-ZA}$ , entre periodos contiguos, periodos post-crítico y final en los ciclos I y VII y entre el período crítico y el postcrítico en el ciclo VI. Las igualdades encontradas pueden deberse a la continuidad temporal entre periodos. A pesar de ello, las diferencias entre los tres periodos del ciclo afectan a las  $C_{CO_2-ZA}$  de forma significativa (p < 0,01).

**Tabla 31. Prueba de Games-Howell: estadístico diferencia de medias ( $t_2$ ), error estándar (SE) nivel crítico (Sig.) y límite inferior (L.I) y límite superior (L.S) para la concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) en período crítico, post-crítico y final para cada ciclo.**

Ciclo	Período	$t_2$	SE	Sig.	95% intervalo de confianza	
					L.I	L.S
I	Post-crítico –Crítico	534,31	10,20	0,00**	510,39	558,23
	Final– Crítico	543,91	11,04	0,00**	518,01	569,80
	Final– Post-crítico	9,60	10,52	0,63	-15,08	34,27
II	Crítico–Post-crítico	707,19	24,11	0,00**	650,66	763,71
	Crítico–final	564,80	24,50	0,00**	507,47	622,13
	Final –Post-crítico	142,39	17,21	0,00**	102,04	182,73
III	Crítico–Post-crítico	623,41	22,45	0,00**	570,75	676,07
	Crítico–final	506,31	21,96	0,00**	454,81	557,81
	Final –Post-crítico	117,10	11,29	0,00**	90,62	143,58
IV	Crítico–Post-crítico	649,78	20,75	0,00**	601,12	698,44
	Crítico–final	1179,01	20,91	0,00**	1129,98	1228,04
	Post-crítico–Final	529,23	15,82	0,00**	492,13	566,33
V	Crítico–Post-crítico	791,35	21,80	0,00**	740,21	842,49
	Crítico–Final	1177,21	22,27	0,00**	1124,98	1229,45
	Post-crítico–Final	385,86	10,39	0,00**	361,50	410,22
VI	Crítico–Post-crítico	0,23	8,19	1,00**	-18,97	19,43
	Final– Crítico	277,04	14,94	0,00**	242,01	312,07
	Post-crítico–Final	277,27	14,83	0,00**	242,50	312,04
VII	Post-crítico– Crítico	46,64	8,31	0,00**	27,17	66,12
	Final– Crítico	42,31	9,11	0,00**	20,95	63,67
	Post-crítico–Final	4,33	8,54	0,87	-15,70	24,36

\*\*p ≤ 0,01.

#### 5.1.1.7 Caracterización energética de los sistemas de climatización y productiva

La Figura 41 muestra que los mayores consumos energéticos del sistema de calefacción se corresponden con los ciclos saturados (III, IV y V), lo cual podría deberse también a menores temperaturas exteriores. Esto es cierto para el III (temperatura media del ciclo de 6,11°C), mientras que, los ciclos IV y V, con temperaturas medias exteriores de 11,49 y 10,44°C respectivamente, requieren mayor energía del sistema de calefacción que el ciclo II, con una temperatura media exterior de 8,62°C.

Concretamente en el ciclo saturado V con una temperatura media exterior de 10,44°C, la demanda energética de calefacción fue un 17% mayor que en el ciclo II, a 8,62°C. Esto solo podría atribuirse al hecho de que calentar aire con altos contenidos de

humedad requiere mayor energía. De ahí se deduce que las restricciones del sistema de ventilación pueden ocasionar mayores gastos en calefacción. Coincidiendo con los resultados obtenidos por Lambert *et al.* (2001), que sugieren que un sistema más fiable que controlase de manera más eficaz la HR a un bajo coste, mejoraría significativamente los controles ambientales en estos edificios. La incorporación de la HR como variable de control podría contribuir a la reducción de los elevados niveles de humedad que resultan en la condensación, y mejorar la eficiencia del sistema de calefacción (Schauberger *et al.*, 2000).

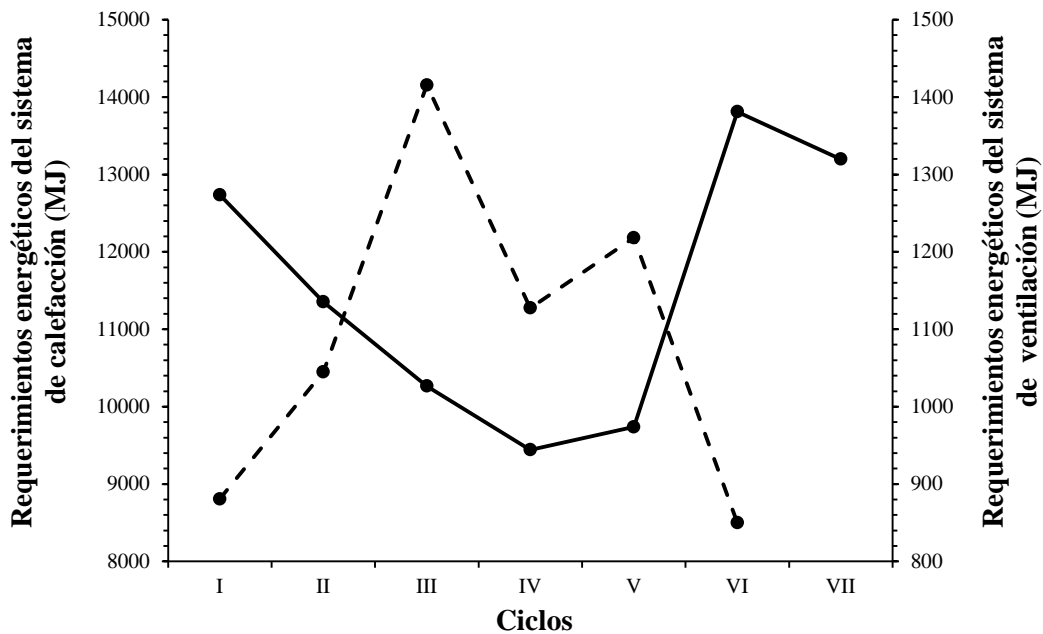


Figura 41. Requerimientos energéticos de los sistemas de calefacción (- -) y ventilación (-) en cada uno de los ciclos.

Los menores consumos de energía del sistema de ventilación se corresponden con los mayores consumos energéticos del sistema de calefacción, es decir, en los ciclos saturados. Esto está justificado por las bajas temperaturas exteriores en el ciclo III, pero no así en los ciclos VI y V, durante los cuales, las restricciones del sistema de ventilación, dieron lugar a la saturación del ambiente y mayores costes energéticos en el sistema de calefacción. Evidentemente la reducción de la ventilación dio lugar a un ahorro energético del 20% entre los ciclos II y IV, pero, como los requerimientos energéticos del sistema de calefacción son, como media, 10 veces mayores que los requeridos por el sistema de ventilación, no supone un ahorro energético global. Ambos requerimientos energéticos presentan tendencias inversas, de modo que los datos

promedios diarios de ambos tienen correlación lineal inversa con un  $R^2$  de 0,84 (Figura A-2 en apéndice).

La temperatura exterior tiene gran incidencia en los requerimientos energéticos, así a medida que ésta asciende, también lo hace la energía del sistema de ventilación, mientras la energía del sistema de calefacción desciende. Dado que los ciclos presentan diferentes duraciones, el estudio de los datos obtenidos se realiza tanto por ciclo como con promedios diarios. La correlación de la energía del sistema de calefacción con la temperatura exterior es mejor por ciclo, presentando un  $R^2$  de 0,75 (Figura A-3), y descendiendo a 0,57 (Figura A-4) para los promedios diarios. La energía del sistema de ventilación por ciclo presenta una tendencia positiva clara con la temperatura exterior, pero no con los datos diarios, donde se muestran dos niveles de energía. Para temperaturas exteriores menores que  $12^{\circ}\text{C}$ , se requiere una media de 24,71 MJ/día, mientras que para las mayores, los requerimientos medios son de 30,8 MJ/día, es decir, un incremento del 25% aproximadamente.

El funcionamiento del sistema de ventilación permite la extracción de gases nocivos para los lechones. Por tanto, a mayor energía aplicada al sistema de ventilación, menores son la HR y la  $C_{CO_2}$ , con valores de  $R^2$  de 0,91 y 0,61 respectivamente (Figura A-5 y Figura A-6). Estos índices ascienden ligeramente con respecto a los valores medios diarios de los requerimientos energéticos del sistema de ventilación (0,99 y 0,63) (Figura A-7 y Figura A-8). También existen relaciones lineales entre la energía del sistema de calefacción y las variables de humedad relativa y  $C_{CO_2}$  con valores de  $R^2$  de 0,66 y 0,63 (Figura A-9 y Figura A-10) para el ciclo mientras que para los valores medios diarios la correlación es de 0,73 y 0,57 (Figura A-11 y Figura A-12). Esto pone de manifiesto la interacción entre la energía del sistema de calefacción y la humedad relativa.

Resulta interesante agregar la componente productiva al análisis energético (Figura 42). Tal y como era de esperar, los ciclos de mayores temperaturas ambientales (I y VI, excluyendo el ciclo VII del que no se poseen datos de energía) presentaron las menores demandas energéticas por peso ganado del lechón. En contra de lo esperable, las mayores demandas no se produjeron en los ciclos más fríos, sino, en los ciclos IV y V, lo cual solo pudo ser debido a la saturación de su ambiente. Por lo tanto, la humedad relativa se manifiesta como la variable ambiental más importante en los consumos

energéticos, por encima de la temperatura, lo cual es consecuencia de no ser considerada para el funcionamiento del sistema de ventilación. Los ciclos IV y V requieren entre un 33 y un 47% más de energía por kg producido en comparación con el ciclo II, con una temperatura exterior inferior a la de los anteriores. Se confirma por tanto que la falta de precisión en el control de las tasas de ventilación es la principal pérdida de producción asociados al control ambiental en los modernos alojamientos ganaderos (Vranken *et al.*, 1996; Taylor *et al.*, 2004; Soldatos *et al.*, 2005; Daskalov *et al.*, 2006).

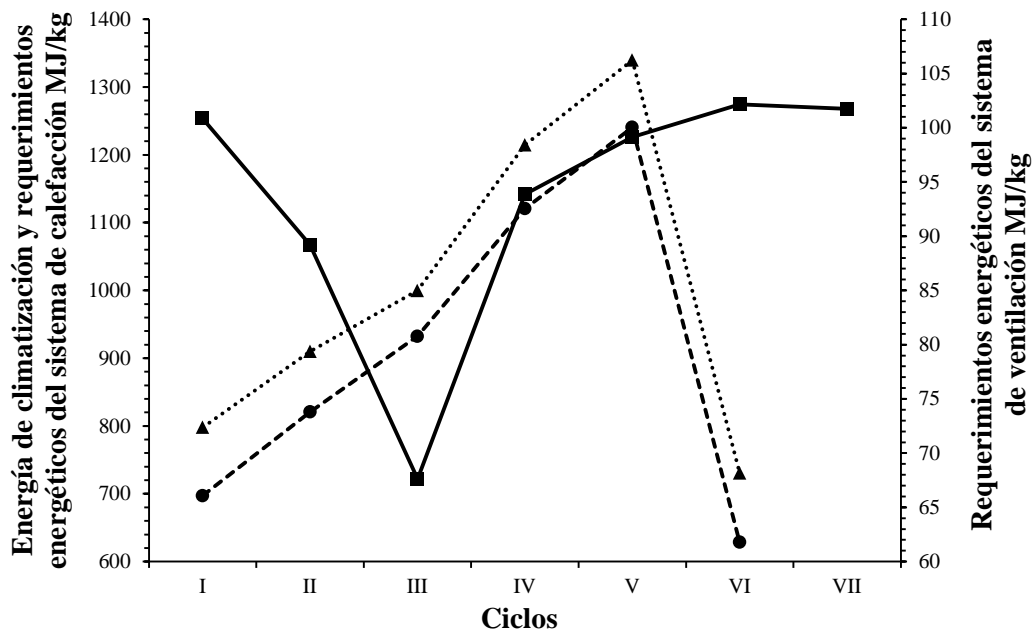


Figura 42. Requerimientos energéticos de los sistemas de calefacción (●) y ventilación (■) y energía de climatización (▲).

## 5.2 PREDICCIÓN LINEAL DE LA $C_{NH_3-ZA}$ A PARTIR DE OTRAS VARIABLES

Los datos empleados para el análisis de amoníaco son desde el 02/03/13 al 17/03/13, que se corresponden con los días 5 a 22 del ciclo X durante los periodos crítico y postcrítico de los lechones con temperaturas de consigna de 26 y 25°C. La duración de este ensayo es debido a la tipología de sensor empleada que se satura, perdiendo fiabilidad, en largos periodos de tiempo con medición continua. Los datos empleados son horarios, ya que, la dinámica de los procesos asociados a la distribución de calor y difusión de gases no permiten establecer buenas relaciones lineales a tiempos menores.

En vista de que las variables anteriormente estudiadas ( $T_{ZA}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $C_{CO_2}$ ) mostraron valores medios diferentes según el período dentro de cada ciclo, se consideró que las concentraciones medias de  $NH_3$  pueden verse afectadas por la temperatura de consigna lo que daría lugar a concentraciones medias diferentes a distintas temperaturas de consigna. Para estudiar el efecto de la temperatura de consigna sobre la  $C_{NH_3-ZA}$ , se llevó a cabo un análisis de medias para comparar ambos grupos de datos.

### 5.2.1 Estudio de la normalidad en la variable $C_{NH_3-ZA}$

A pesar de que el comportamiento de muchas variables puede ser descrito mediante una distribución normal, es preciso comprobar si la distribución de la variable  $C_{NH_3-ZA}$  sigue esta estructura teórica.

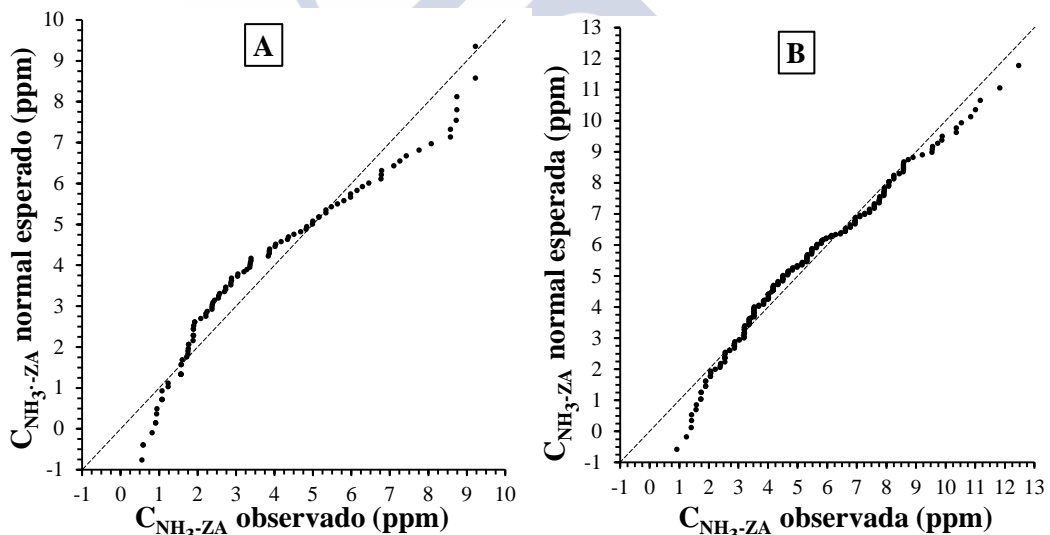
#### 5.2.1.1 Prueba de normalidad

La prueba de Kolmorov-Smirnov permite contrastar la hipótesis nula de que los datos muestrales proceden de poblaciones normales. La Tabla 32 muestra el estadístico de Kolmorov-Smirnov acompañado de su correspondiente nivel crítico (Sig). Se rechazará la hipótesis de normalidad cuando el nivel crítico sea menor que el nivel de significación establecido, 0,05. El estadístico, para ninguno de los grupos tiene asociados niveles críticos mayores de 0,05 por lo que inicialmente se establece que la  $C_{NH_3-ZA}$  no procede de una población normal.

**Tabla 32. Prueba de normalidad para la concentración de  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) para las temperaturas de consigna ( $T_C$ ) de 26 y 25°C.**

Grupo	Kolmogorov-Smirnov		
	Estadístico	gl	Sig.
$C_{\text{NH}_3\text{-ZA}} T_C = 26^\circ\text{C}$	0,12	120	0,00
$C_{\text{NH}_3\text{-ZA}} T_C = 25^\circ\text{C}$	0,07	216	0,01

La Figura 43 muestra los gráficos Q-Q normal donde cada valor observado ( $Y_i$ ) es comparado con la puntuación  $NZ_i$  que le correspondería en una distribución normal estandarizada. Cuando una muestra procede de una población normal, los puntos correspondientes a cada par se encuentran agrupados en torno a la diagonal representada en el diagrama. Las desviaciones de la diagonal indican desviaciones de la normalidad. En este caso se observan claras desviaciones, especialmente en la muestra a una  $T_C$  de 26°C, aunque a 25°C tampoco se obtuvo normalidad.



**Figura 43. Gráfico Q-Q normal para la concentración de  $\text{NH}_3$  en zona animal ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) para la temperatura de consigna de 26°C (A) y para la temperatura de consigna de 25°C (B).**

5.2.1.1.1 Prueba de normalidad para la variable  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  y transformación de Box-Cox

La

Tabla 33 muestra los valores obtenidos de  $\lambda_{BC}$  para llevar a cabo la transformación de la variable  $C_{NH_3-ZA}$  para cada grupo. En este caso, cada valor del grupo temperatura de consigna de 26°C se eleva a la potencia 0,254 y los valores del grupo temperatura de consigna se elevan a 0,463.

**Tabla 33. Valores de  $\lambda_{BC}$  obtenidos a partir de la transformación de Box-Cox para las distribuciones de la  $C_{NH_3-ZA}$  para las temperaturas de consigna ( $T_C$ ) de 26 y 25°C.**

Grupo	Valor de $\lambda_{BC}$
$C_{NH_3-ZA} T_C = 26^\circ C$	0,254
$C_{NH_3-ZA} T_C = 25^\circ C$	0,463

Una vez aplicada la transformación de Box-Cox, se comprueba de nuevo la normalidad de las variables. La Tabla 34 muestra la prueba de normalidad mediante el estadístico de Kolmorov-Smirnov. Para las dos variables, el estadístico tiene asociado niveles críticos mayores de 0,05 por lo que ahora se puede concluir que las variables  $C_{NH_3-ZA}$  a 26°C y  $C_{NH_3-ZA}$  a 25°C de  $T_C$  proceden de poblaciones normales.

**Tabla 34. Pruebas de normalidad para la variable transformada de concentración de  $NH_3$  ( $C_{NH_3-ZA}$ ) para las temperaturas de consigna ( $T_C$ ) de 26 y 25°C.**

Grupo	Kolmogorov-Smirnova		
	Estadístico	gl	Sig.
$C_{NH_3-ZA} T_C = 26^\circ C$	0,07	109	0,20
$C_{NH_3-ZA} T_C = 25^\circ C$	0,06	241	0,07

La Figura 44 muestra el gráfico Q-Q normal, en él se puede observar como para ambos grupos los puntos correspondientes a cada par se encuentran agrupados en torno a la diagonal representada en el diagrama, muestra de la normalidad de la variable transformada.

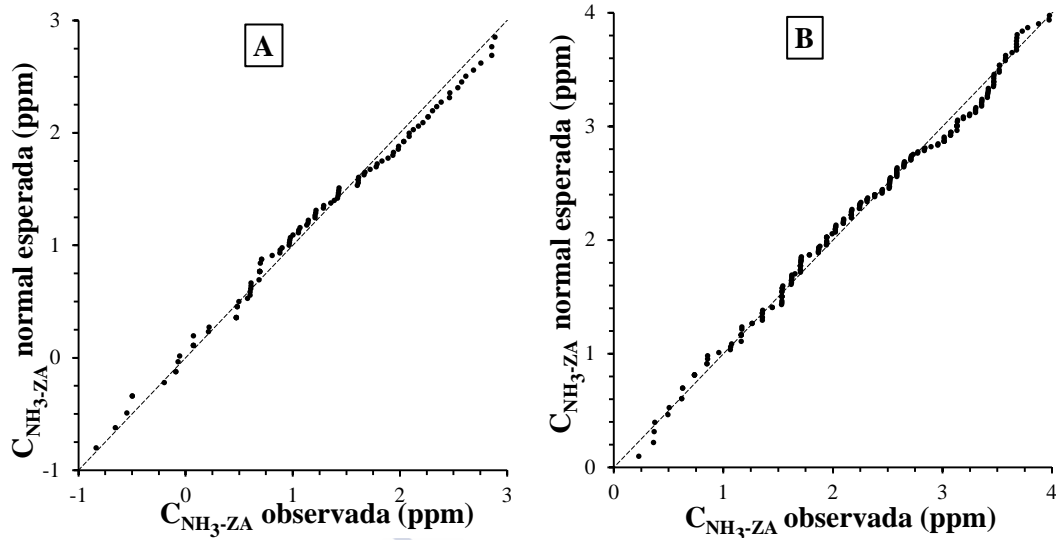


Figura 44. Gráfico Q-Q normal para la variable transformada de concentración de  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) temperatura de consigna de 26°C (A) y para la temperatura de consigna de 25°C (B).

#### 5.2.1.2 Prueba T para la diferencia de medias de $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ a $T_C$ 26 y 25°C

La Tabla 35 muestra estadísticos de la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  a  $T_C$  de 26 y 25°C, el número de casos, la media, la desviación típica y el error típico. Podemos comprobar como la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  para la temperatura de consigna de 26°C es inferior que la concentración para la temperatura de consigna de 25°C. Estos valores estarían relacionados con el crecimiento de los animales y la restricción de la ventilación durante los periodos iniciales del ciclo en los que se ubican los datos.

Tabla 35. Estadísticos para concentración de  $\text{NH}_3$  ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) para las temperaturas de consigna ( $T_C$ ) de 26 y 25°C.

Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
$C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ $T_C = 26^\circ\text{C}$	120	3,85	2,42	0,22
$C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ $T_C = 25^\circ\text{C}$	216	5,38	2,42	0,16

La Tabla 36 ofrece, en primer lugar, el contraste de Levene utilizado para comprobar el supuesto de igualdad de varianzas poblaciones. Se establece como hipótesis nula la igualdad de varianzas:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

**Tabla 36 . Prueba T para la igualdad de medias: estadístico de Levene ( $W_1$ ), nivel crítico de la prueba  $W_1$  (Sig.F), estadístico para diferencia de medias ( $t_3$ ), grados de libertad (gl), nivel crítico de la prueba T (Sig. $t_3$ ), diferencia de medias ( $\neq$  Med.), diferencia de error estándar ( $\neq$  SE) y límite inferior (L.I) y superior (L.S) del intervalo de confianza para la variable concentración de NH3 en zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ) según las temperatura de consigna de 26 y 25°C.**

	$W_1$	Sig. $W_1$	$t_3$	gl	Sig. $t_3$	$\neq$ Med.	$\neq$ SE	95% intervalo de confianza de la $\neq$	
								L.I	L.S
<b>Se asumen varianzas =</b>	0,27	0,60	-5,57	334	0,00	-1,53	0,28	-2,08	-0,99
<b>No se asumen varianzas =</b>			-5,58	246,00	0,00	-1,53	0,28	-2,08	-0,99

Dado que la probabilidad (Sig.  $W_1$ ) asociada al estadístico de Levene es mayor que 0,05, las varianzas son iguales, en caso contrario, si es menor se asumirá que las varianzas no son iguales. En este caso, con una sig. F de 0,60 (mayor que 0,05) debemos aceptar la hipótesis nula, que asume que las varianzas son iguales. Se cumple por tanto el supuesto de homocedasticidad, y consecuentemente utilizaremos la información de la primera fila donde se observa que el estadístico t tiene un valor de -5,57. Siendo 0,000 su nivel crítico bilateral asociado y menor que 0,05 podemos rechazar la hipótesis nula que asume la igualdad de promedios:

$$H_0: \mu_1^2 = \mu_2^2$$

$$H_1: \mu_1^2 \neq \mu_2^2$$

De ello se concluye que los grupos definidos por la variable  $T_C$  proceden de poblaciones de distinto promedio, por lo que los dos grupos comparados difieren significativamente en  $C_{NH_3-ZA}$ . Esto se corrobora mediante los límites del intervalo de confianza, entre -2.08 y -0,99, sin la inclusión del valor 0 en el intervalo. Se concluyó

que la  $C_{NH_3-ZA}$  se ve afectada por la temperatura de consigna y por lo tanto se decidió tratar los datos en adelante como dos grupos.

### 5.2.2 Estadísticos descriptivos de las variables estudiadas para $T_C$ de 26 y 25°C.

La Tabla 37 muestra los estadísticos descriptivos obtenidos para los datos horarios de las variables,  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$ ,  $VIN_{ZA}$ ,  $V_{EX}$ ,  $T_{ZA}$ ,  $T_{PEX}$ ,  $AA_L$  y  $AA_M$ .

**Tabla 37. Valor mínimo (Mín.), máximo (Máx), medio (Med.) y desviación estándar (SD) de las variables: concentraciones de  $NH_3$  ( $C_{NH_3-ZA}$ ) y  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ), humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ), velocidad interior ( $VIN_{ZA}$ ) y exterior ( $V_{EX}$ ), temperatura del pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) y en zona animal ( $T_{ZA}$ ), actividad animal ligera ( $AA_L$ ) y moderada ( $AA_M$ ) a partir de datos horarios para las temperaturas de consigna ( $T_C$ ) de 26°C y 25°C.**

$T_C = 26^\circ C$	Mín.	Máx.	Med.	SD
$C_{NH_3-ZA}$	0,39	9,22	3,52	2,35
$C_{CO_2-ZA}$	2125,35	4860,68	2962,07	643,28
$HR_{ZA}$	47,18	74,70	56,78	6,11
$VIN_{ZA}$	0,01	0,02	0,013	3E-03
$V_{EX}$	0,15	0,84	0,42	0,16
$T_{PEX}$	12,13	18,80	15,08	1,61
$T_{ZA}$	27,50	28,98	28,12	0,32
$AA_L$	0,00	150,92	34,53	36,80
$AA_M$	1,04	188,74	45,53	46,55
$T_C = 25^\circ C$	Mín.	Máx.	Med.	SD
$C_{NH_3-ZA}$	0,76	12,47	5,24	2,37
$C_{CO_2-ZA}$	2277,47	4582,67	3199,72	393,50
$HR_{ZA}$	48,98	62,65	56,95	3,02
$VIN_{ZA}$	0,01	0,04	0,02	0,01
$V_{EX}$	0,31	0,91	0,50	0,11
$T_{PEX}$	6,36	15,58	10,71	2,39
$T_{ZA}$	27,35	28,47	27,88	0,21
$AA_L$	0,00	72,73	9,93	14,83
$AA_M$	0,00	70,10	11,25	15,57

Las  $C_{NH_3-ZA}$  medias están muy por debajo de las recomendaciones más estrictas establecidas en 10 ppm para granjas porcinas australianas por Cargill *et al.* (2002), estando incluso por debajo del valor  $6\pm 0.5$  ppm considerado como ambiente limpio según Lee *et al.* (2005), tanto para 26 como para 25 °C. Sin embargo el valor máximo

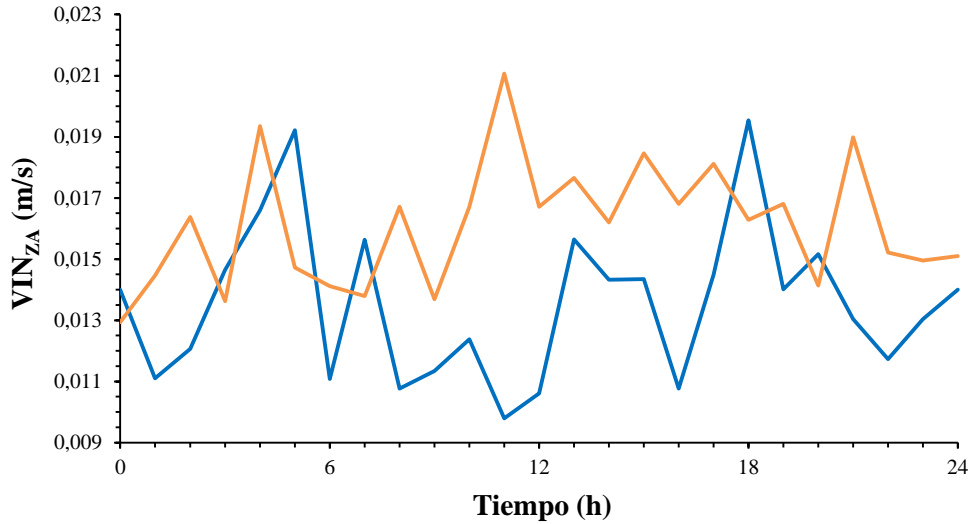
está por encima de las recomendaciones de Cargill *et al.* (2002) para 25°C y de los 7 ppm establecidos por Donham *et al.* (2002) para ambas temperaturas. Para 25°C el valor máximo medido se encuentra próximo al límite de 15 ppm, a partir del cual Bottcher *et al.* (2001) recomiendan tomar precauciones. Los lechones están en ambiente limpio (Lee *et al.*, 2005) el 85,32% y el 66,67% del tiempo para 26°C y 25°C respectivamente, y solamente el 14,68% (para 26°C) y el 33,33% (para 25°C) se supera el límite establecido por Donham *et al.* (2002). Durante las dos primeras semanas, consideradas como el período crítico para el lechón desde el punto de vista zootécnico (Le Dividich y Herpin, 1994), se producen menores concentraciones, cuyos valores máximos no superan las 10 ppm. Si comparamos con los valores obtenidos por otros autores para granjas de cebo porcino convencionales en diferentes países (Tabla 1) los valores obtenidos en este trabajo son mucho más bajos, mostrándose próximo al observado por Ngwabie *et al.* (2011) con un valor medio de 3,9-5,4 ppm.

Los niveles medios de CO<sub>2</sub> están muy próximos a 3000 ppm, concentración de seguridad máxima sugerida por diversos autores (Bruce, 1981; CIGR, 1992; Nicks *et al.*, 1993; Cargill y Skirrow, 1997; Lee *et al.*, 2005), e incluso superando este valor el 30,28% y el 69,58% del tiempo para 26 y 25°C respectivamente. Los niveles máximos de CO<sub>2</sub> recomendados por Donham (1991) de 1540 ppm son superados a lo largo de toda la medición. Esto es debido a que durante el destete, el control ambiental se fundamenta en una elevada restricción de la ventilación, sobre todo en los primeros periodos de esta fase, lo que conlleva una deficiente eliminación de los gases tóxicos de la atmósfera interior, especialmente del CO<sub>2</sub>, que por su densidad mayor a la del aire, tiende a acumularse en las capas inferiores.

Para ambas temperaturas de consigna, el valor medio de humedad relativa se encuentra por debajo del 60-65% recomendado por Forcada *et al.* (2009) y Fuentes (1992), pero dentro del 50-75% fijado por Kamada y Notsuki (1987) para cerdos de cebo. Durante el 77,98% (26°C) y el 83,33% (25°C) del tiempo la humedad relativa se encuentra por debajo del 60%, no alcanzando nunca los límites establecidos entre el 40 y el 80% por Forcada *et al.* (2009).

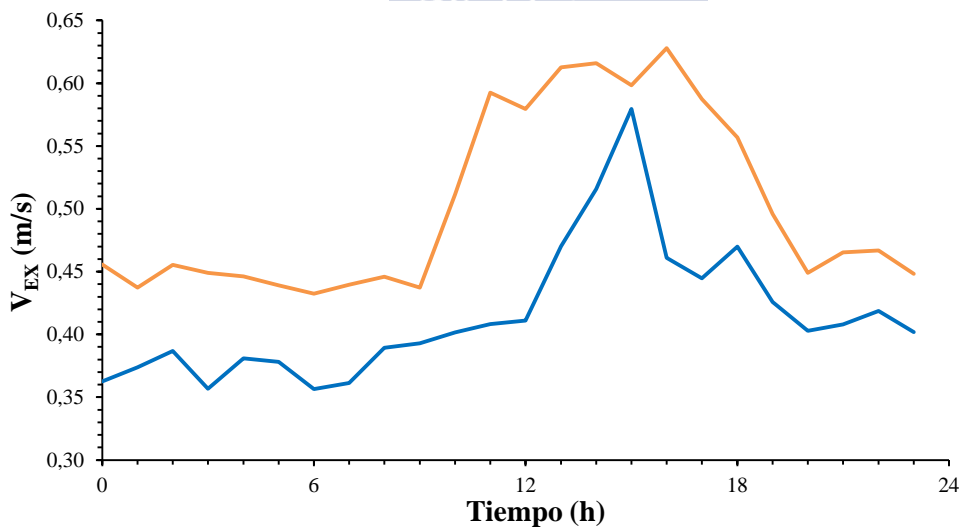
La velocidad del aire en la zona animal ( $VIN_{ZA}$ ) está por debajo de los valores de 0,1-0,4 establecidos por autores como Forcada (1997) para lechones destetados de 5 a 30 kg. Los valores de la velocidad del aire de salida fueron mayores para la temperatura

de consigna de 25°C. Esto es muestra de que las restricciones de ventilación son mayores durante el primer periodo ( $T_C = 26^\circ\text{C}$ ). La Figura 45 muestra la evolución de los valores medios diarios.



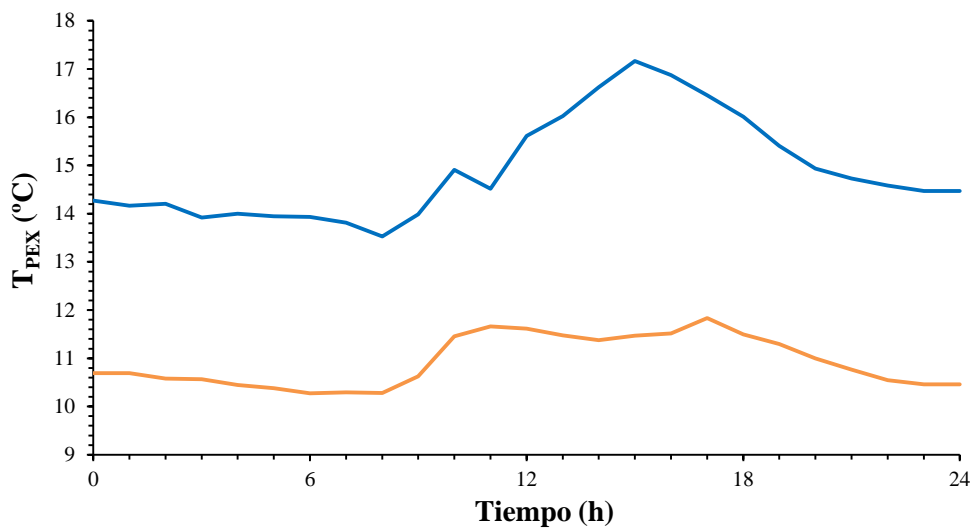
**Figura 45. Evolución de los valores medios horarios de la velocidad interior ( $V_{IN_{ZA}}$ ) para las temperaturas de consigna de 26°C (—) y 25°C (—).**

La velocidad media diaria de la  $V_{EX}$  (Figura 46) muestra dos niveles diferentes para ambas temperaturas de consigna, claramente inferior para la temperatura de consigna de 26°C. En ambos casos presenta un patrón diario claro, alcanzando los máximos durante el mediodía, cuando las temperaturas son más altas. Para la temperatura de consigna de 26°C se producen tres picos de ventilación máxima a las 11, 13 y 18 h y para la temperatura de consigna de 25°C uno entorno a las 15 h.



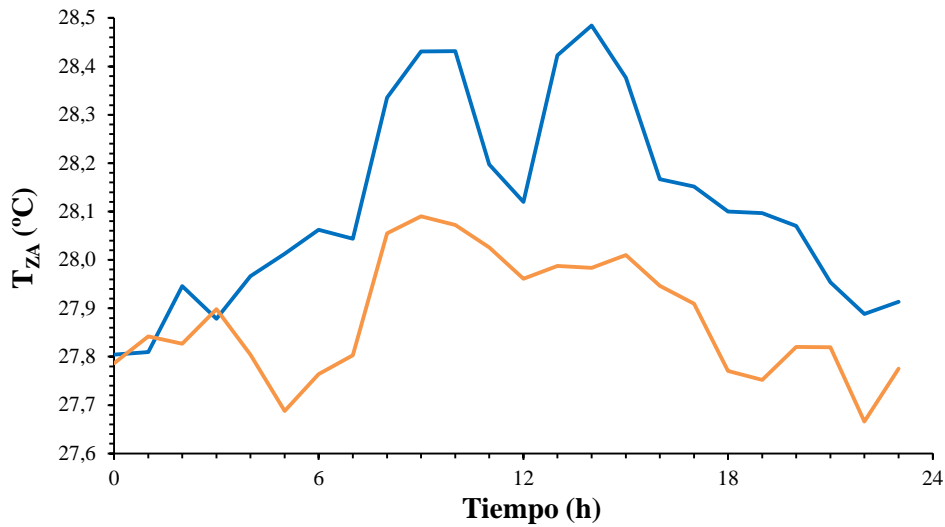
**Figura 46. Evolución de los valores medios horarios de la velocidad del aire de salida ( $V_{EX}$ ) para las temperaturas de consigna de 26°C (—) y 25°C (—).**

Tal y como se puede observar en la Figura 47, la  $T_{PEX}$  media diaria muestra una evolución similar a la  $V_{EX}$ , con valores mínimos durante la noche, y los valores más altos entorno al mediodía para los períodos con temperatura de consigna de 26 y 25°C. La  $T_{PEX}$  media diaria muestra valores más altos para temperatura de consigna de 26°C alcanzando dos máximos a las 10 h y a las 16 h. La  $T_{PEX}$  media diaria para la temperatura de consigna de 25°C es más baja y alcanza sus máximos a las 11 h y a las 17 h. Se señala que, a pesar de que las temperaturas exteriores son más altas durante la asignación de una temperatura de consigna de 26°C, las restricciones de ventilación siguen siendo mayores que para una consigna de 25°C.



**Figura 47. Evolución de los valores medios horarios de la temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) para las temperaturas de consigna de 26°C (—) y 25°C (—).**

Para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C, el rango de temperaturas observado en la zona animal (Figura 48) está dentro de las temperaturas recomendadas mínimas (19 - 25°C) y un poco por debajo de las máximas (30 - 32°C) (Muirhead y Alexander, 1997). Para ambas temperaturas de consigna, la  $T_{ZA}$  es más baja durante la noche y más alta durante el día, con dos valores máximos a las 09:00-10:00 h y a las 14:00-15:00 h. Además para las dos temperaturas de consigna coincide la  $T_{ZA}$  mínima diurna, entorno a las 12:00 h, hecho destacable que diferencia claramente estas curvas del comportamiento de las variables anteriores.



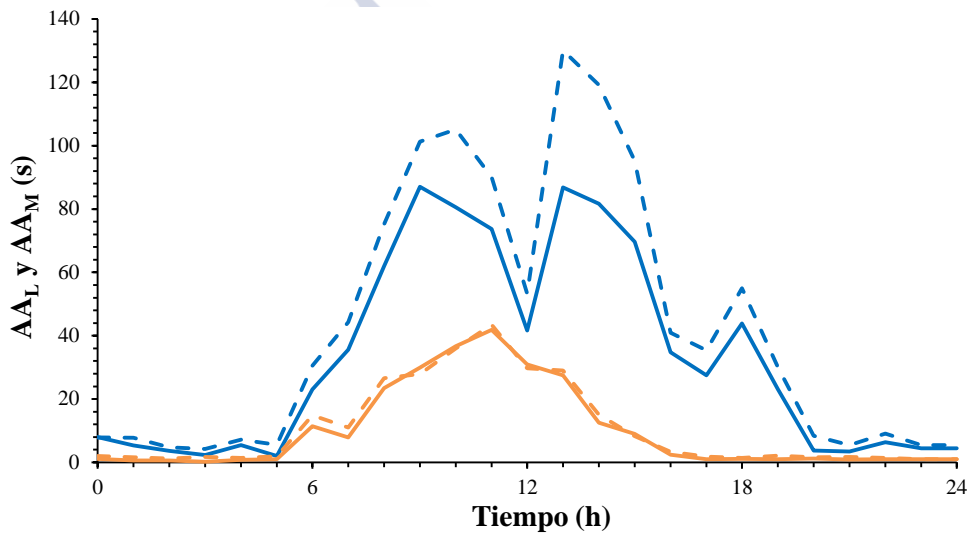
**Figura 48. Evolución de los valores medios horarios de la temperatura en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) para las temperaturas de consigna de 26°C (—) y 25°C (- -).**

En la Figura 49 se muestra la evolución de la actividad animal para las dos temperaturas de consigna. El nivel de actividad a 26°C de temperatura de consigna es claramente mayor que a 25°C, con medias que más que triplican el valor de esta última. Esto se debe a que, durante el inicio de ciclo los lechones muestran mayor excitación hasta que se adaptan al nuevo local, entorno social, manejo y distribución de alimento y bebida (Le Dividich y Herpin, 1994). Los equipos que detectan actividad ligera y moderada dan lugar a dos curvas, estando generalmente  $AA_L$  por encima de  $AA_M$ . Estas diferencias son más evidentes durante los máximos de actividad, a temperaturas de consigna de 26°C, mientras que a 25°C, ambas curvas prácticamente se solapan.

Para la temperatura de 26°C, se observan tres máximos de actividad a las 9:00, a las 13:00 y a las 18:00 h, al igual que observaron Arango *et al.* (2013), donde la actividad se incrementa durante el día presentando 3 máximos, los dos más acentuados durante la mañana y el mediodía, y un tercero a última hora de la tarde. Además, la actividad nocturna es muy reducida y su duración es mayor en invierno (12 h), que en verano (9 h). Esta tendencia es similar al modelo camello propuesto por CIGR (2002). Para la temperatura de 25°C, la actividad es mayor al mediodía siendo máxima en torno a las 11 h. La duración del período de descanso nocturno fue de 10 h (de 20:00 a 05:00 h) para la temperatura de consigna de 26°C y de 12 h (de 17:00 a 05:00 h) para la temperatura de consigna de 25°C. El modelo dromedario de CIGR (2002) sintetiza esta respuesta de la actividad animal.

Los resultados obtenidos confirman lo establecido por Pedersen *et al.* (1998), según el cual, se producen picos de actividad por la mañana y por la tarde, coincidentes con el suministro de la alimentación a los animales, lo cual se produce dos veces al día. Así mismo responden a los patrones de actividad obtenidos para cerdos destetados por Besteiro *et al.* (2017) mediante la aplicación del análisis espectral, que pueden ser modelados mediante el conjunto de tres curvas cosenoidales.

La actividad mínima se produce durante el reposo nocturno y es muy reducida, siendo cuantificada en un 6% de la media de la actividad diurna. Este valor es bastante inferior al obtenido por Blanes y Pedersen (2005) que observaron valores de un 25% de la media de actividad diurna.



**Figura 49. Evolución de los valores medios horarios de la actividad ligera ( $AA_L$ ) (—) y actividad moderada ( $AA_M$ ) (- -) para la temperatura de consigna de 26°C y valores medios horarios de la actividad ligera ( $AA_L$ ) (—) y actividad moderada ( $AA_M$ ) (- -) para la temperatura de consigna de 25°C.**

La actividad animal reducida durante la parte central del día puede tener su origen en el comportamiento alimentario, junto con el ascenso de temperaturas que se produce durante estas horas. Esta respuesta del animal tiene consecuencias en la  $T_{ZA}$ , cuya evolución diaria muestra un patrón claramente paralelo al de actividad, estando además relacionada con el funcionamiento del equipo de climatización, representado aquí por  $V_{EX}$ , que a su vez está condicionado por la temperatura exterior  $T_{PEX}$ .

### 5.2.3 Correlación entre las variables estudiadas para T<sub>C</sub> de 26 y 25°C.

En la Tabla 38 se muestran los resultados del análisis de correlación (R) realizado sobre las medias horarias según las temperaturas de consigna (26 y 25°C) para C<sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>, C<sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>, HR<sub>ZA</sub>, VIN<sub>ZA</sub>, V<sub>EX</sub>, T<sub>PEX</sub>, T<sub>ZA</sub>, AA<sub>L</sub> y AA<sub>M</sub>.

**Tabla 38. Matriz de correlación a partir de datos horarios de las variables: concentraciones de NH<sub>3</sub> (C<sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>) y CO<sub>2</sub> (C<sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>) en zona animal, humedad relativa en zona animal (HR<sub>ZA</sub>), velocidad interior (VIN<sub>ZA</sub>) y exterior (V<sub>EX</sub>), temperatura en el pasillo exterior (T<sub>PEX</sub>) y en zona animal (T<sub>ZA</sub>) y actividad animal ligera (AA<sub>L</sub>) y moderada (AA<sub>M</sub>) para temperaturas de consigna (T<sub>C</sub>) de 26°C y 25°C.**

<b>Correlación para T<sub>C</sub> = 26°C</b>									
	C <sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>	C <sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>	HR <sub>ZA</sub>	VIN <sub>ZA</sub>	V <sub>EX</sub>	T <sub>PEX</sub>	T <sub>ZA</sub>	AA <sub>L</sub>	AA <sub>M</sub>
C <sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>	1,00	0,91**	0,78**	0,01	-0,72**	-0,80**	0,03	-0,05	-0,07
C <sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>	0,91**	1,00	0,86**	-0,04	-0,70**	-0,76**	0,10	0,11	0,10
HR <sub>ZA</sub>	0,78**	0,86**	1,00	0,03	-0,44**	-0,74**	-0,10	0,13	0,15
VIN <sub>ZA</sub>	0,01	-0,04	0,03	1,00	-0,21	-0,11	-0,08	-0,12	-0,11
V <sub>EX</sub>	-0,72**	-0,70**	-0,44**	-0,21	1,00	0,60**	-0,17	0,09	0,12
T <sub>PEX</sub>	-0,80*	-0,78**	-0,74**	-0,11	0,60**	1,00	-0,35**	0,23*	0,25**
T <sub>ZA</sub>	0,03	0,10	-0,10	-0,08	-0,17	-0,35**	1,00	0,59**	0,59**
AA <sub>L</sub>	-0,05	0,11	0,13	-0,12	0,09	0,23*	0,59**	1,00	0,97**
AA <sub>M</sub>	-0,07	0,10	0,15	-0,11	0,12	0,25**	0,59**	0,97**	1,00
<b>Correlación para T<sub>C</sub> = 25°C</b>									
	C <sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>	C <sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>	HR <sub>ZA</sub>	VIN <sub>ZA</sub>	V <sub>EX</sub>	T <sub>PEX</sub>	T <sub>ZA</sub>	AA <sub>L</sub>	AA <sub>M</sub>
C <sub>NH<sub>3</sub>-ZA</sub>	1,00	0,55**	0,16*	-0,35**	-0,65**	-0,29**	-0,08	0,01	0,01
C <sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>	0,55**	1,00	0,52**	-0,18**	-0,47**	-0,42**	-0,16*	0,08	0,04
HR <sub>ZA</sub>	0,16*	0,52**	1,00	-0,14*	-0,17**	-0,20**	0,09	0,24**	0,17**
VIN <sub>ZA</sub>	-0,35**	-0,18**	-0,14*	1,00	0,31**	0,14*	0,06	0,05	0,09
V <sub>EX</sub>	-0,65**	-0,47**	-0,17**	0,31**	1,00	0,28**	0,32**	0,16*	0,19**
T <sub>PEX</sub>	-0,29**	-0,42**	-0,20**	0,14*	0,28**	1,00	0,12	0,13*	0,15*
T <sub>ZA</sub>	-0,08	-0,16*	-0,10	0,06	0,32**	0,12	1,00	0,36**	0,37**
AA <sub>L</sub>	0,01	0,08	0,24**	0,05	0,16*	0,13*	0,36**	1,00	0,94**
AA <sub>M</sub>	0,01	0,04	0,17**	0,09	0,20**	0,15*	0,38**	0,94**	1,00

\* p ≤ 0,05. \*\* p ≤ 0,01. † las correlaciones con la variable VIN<sub>ZA</sub> no se tienen en cuenta debido a que se produjo pérdida de datos en el sensor, por lo tanto se dispone de pocos datos por lo que ninguna relación de correlación es significativa.

En general, las correlaciones son más altas para la consigna de 26°C, que para la de 25°C. De los 40 valores calculados, solo 9 descienden su valor al pasar de 26 a 25°C de consigna. De ellos, 4 relacionan la  $VIN_{ZA}$  con las concentraciones de gases y con la  $V_{EX}$  y  $T_{PEX}$ , otras 3 relacionan la  $HR_{ZA}$  con la actividad animal y la  $T_{AZ}$ , mientras que las 2 restantes relacionan esta última variable con la concentración de amoníaco y con  $V_{EX}$ . De ello se desprende la importante incidencia de la temperatura de consigna en la dinámica de flujos de masa y energía que se produce en el alojamiento.

Se observó una fuerte correlación entre  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  con un  $R= 0,91$  y  $0,55$  para 26 y 25°C respectivamente, estos valores son similares a los observados por otros autores para el interior de alojamientos de cerdos de engorde. Un valor intermedio fue obtenido por Duchaine *et al.* (2000) que observó un  $r_{ho}^1 = 0,68$  entre los niveles de  $NH_3$  y  $CO_2$ . En esta línea Jeppsson (2002) estableció valores muy similares a los aquí obtenidos, con un rango de correlación de 0,59-0,89 entre las emisiones de  $CO_2$  y de  $NH_3$ . Por último Philippe *et al.* (2007) observaron márgenes de  $R$  más estrechos, de 0,76 en suelo emparrillado y de 0,78 en cama de paja. Ya para otra especie, gallinas concretamente ponedoras, Ni *et al.* (2017) también encontraron correlación entre las emisiones de  $NH_3$  y  $CO_2$  con un rango de 0,67-0,61. Por el contrario, para alojamientos de vacuno lechero, Kaasik y Maasikmets (2013) apenas obtuvieron correlación entre las concentraciones de  $NH_3$  y  $CO_2$  ( $R = 0,013$ ). Esto puede ser debido a que es un espacio mucho mayor ocupado por un gran volumen de aire donde el  $NH_3$  se diluye rápidamente, junto con el empleo de ventilación natural con respecto de forzada, lo cual reduce la velocidad del aire en el interior del alojamiento y, por tanto, modifica la dinámica de extracción de gases. Tanto para todos los autores citados como para este trabajo, la correlación fue positiva, es decir las dos variables se correlacionan en sentido directo, a valores altos de  $C_{NH_3-ZA}$  le corresponden valores altos de  $C_{CO_2-ZA}$  e igualmente con los valores bajos.

<sup>11</sup> El coeficiente de Spearman es una medida de la correlación entre dos variables aleatorias continuas, se utiliza cuando los datos no proceden de una distribución normal. La interpretación del coeficiente de Spearman es igual que la del coeficiente de correlación de Pearson. Oscila entre -1 y +1, indicándonos asociaciones negativas o positivas respectivamente, 0 cero, significa no correlación pero no independencia.

La diferencia entre las correlaciones entre las concentraciones de ambos gases para las dos temperaturas de consigna es evidente y deben estar relacionadas con el funcionamiento del sistema de ventilación. Cuando el sistema de ventilación funciona de forma más restrictiva ( $T_C = 26^\circ\text{C}$ ), la correlación es mayor, mientras que un aumento de la tasa de ventilación ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ ) la reduce.

La correlación entre la  $T_{ZA}$  y la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  para ambos grupos fue prácticamente nula y no significativa muy al contrario de los resultados observados por otros autores. Jeppsson (2002) observó un intervalo de correlación entre 0,86 y 0,91 entre la emisión de  $\text{NH}_3$  y la temperatura interior, durante 6 días de medición. Por otra parte, Pereira *et al.* (2012) establecieron un intervalo de  $R^2$  de 0,95-0,97 para alojamientos de vacas lecheras, empleando cámaras estáticas y midiendo la emisión de  $\text{NH}_3$  cada 1,3 y 6 h y después cada 12 h hasta llegar a las 120 h de medición. Esta diferencia podría ser debida, a las ubicaciones de los sensores por parte de los dos autores, ya que ambos emplearon el término de temperatura interior. Jeppsson (2002) midió dicha temperatura en la entrada de aire de la sala, y Pereira *et al.* (2012) aplicaron temperaturas de 5, 15, 25 y  $35^\circ\text{C}$ . Por tanto, dichas temperaturas están más cercanas a la ubicación y a los valores observados de la variable  $T_{PEX}$  de este estudio. Otros motivos podrían ser la diferencia entre los alojamientos, para cebo porcino en el caso de Jeppsson (2002) y para vacuno de leche en el de Pereira *et al.* (2012) y claramente el periodo de medición fue menor que el presente caso.

Para ambos grupos se observó una correlación negativa entre la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  y la  $T_{PEX}$ , siendo mucho mayor para  $26^\circ\text{C}$  ( $R = -0,80$ ) que para  $25^\circ\text{C}$  ( $R = -0,29$ ). Esta correlación indica que a valores altos de  $\text{NH}_3$  le corresponden valores bajos de  $T_{PEX}$  y viceversa. Este efecto puede ser explicado por las tasas de ventilación, ya que para granjas porcinas y avícolas generalmente la ventilación es mecánica y está controlada en base a la temperatura (Koerkamp *et al.*, 1998), es decir, cuando las temperaturas exteriores bajan, se produce un descenso en la tasa de ventilación en el interior del alojamiento, con el consecuente aumento de la concentración de  $\text{NH}_3$ . Esto se confirma porque, para la ventilación representada por  $V_{EX}$ , la correlación con la variable  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  fue de -0,72 y -0,65 para 26 y  $25^\circ\text{C}$  respectivamente, valores algo inferiores al encontrado por Blanes *et al.* (2008), con un  $R^2$  de 0,61.

Por lo que respecta a la  $VIN_{ZA}$ , que también caracteriza indirectamente a la ventilación, su correlación con la  $C_{NH_3-ZA}$  fue de -0,35 para 25°C y muy inferior para 26°C. Estos valores son más bajos que los observados por Blanes *et al.* (2008) en alojamientos de cerdos de engorde con un  $R^2 = 0,79$ . Valores altos de  $C_{NH_3-ZA}$  son indicativos de que la intensidad de la ventilación es baja. Durante la noche la actividad animal es muy baja (Figura 49) y en consecuencia la  $C_{NH_3-ZA}$ . Sin embargo, al estar limitado el funcionamiento de la ventilación a las tasas mínimas durante la noche, para minimizar las pérdidas de calor, el sistema no extrae todo el  $NH_3$  producido.

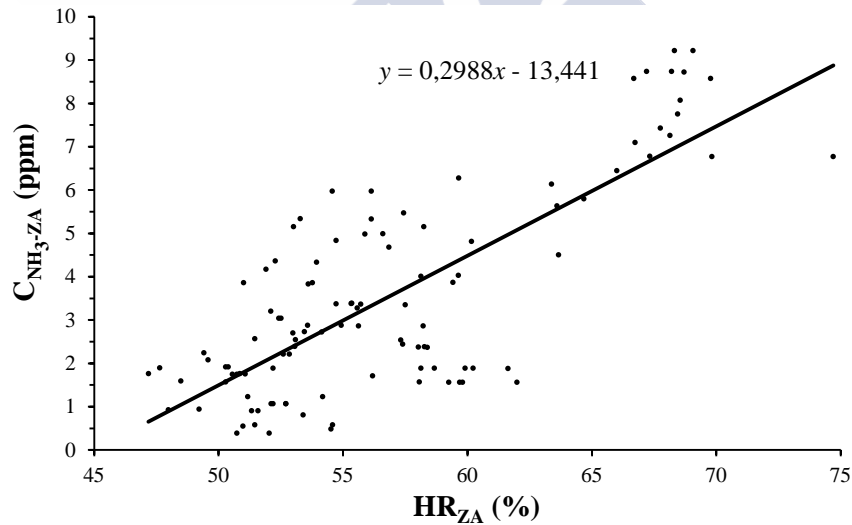
La correlación entre la  $HR_{ZA}$  y la  $C_{NH_3-ZA}$  osciló entre 0,78 y 0,16 ( $R^2 = 0,61$  y 0,03) para 26 y 25°C respectivamente. Para la temperatura de consigna de 25°C, la correlación está próxima a la de Jeppsson (2002), que encontró un rango de valores de correlación entre la  $C_{NH_3}$  y la emisión de vapor de agua de 0,74 - 0,85. Entre ambas está el valor hallado por Choi (2005) en granjas porcinas, con un  $R^2$  de 0,44. Algo más bajos, pero también entre los valores hallados se encuentran los resultados de Ni *et al.* (2017), con un rango de correlación de 0,24-0,22 entre la emisión de  $NH_3$  y la HR medida en el aire de la jaula donde se ubica el animal. Aquí hay que tener en cuenta que la emisión incluye también la tasa de ventilación junto con la concentración de  $NH_3$ .

Las correlaciones entre  $C_{NH_3-ZA}$  y la actividad animal, tanto ligera ( $AA_L$ ) como moderada ( $AA_M$ ) fueron muy bajas y no significativas, al igual que en el caso de la  $T_{ZA}$ , lo cual es coherente con los resultados que proporcionaron que actividad y temperatura presentan patrones diarios similares. Sin embargo, es necesario destacar que el rango de resultados obtenidos por otros autores es muy amplio. Blanes *et al.* (2008) observaron un  $R^2 = 0,94$ , algo más alto que Jeppsson (2002) con un rango entre 0,69 y 0,83, mientras que los resultados de Sousa y Pedersen (2004) son claramente inferiores, con correlaciones entre 0,15 y 0,56 para cerdos en engorde.

Además de las correlaciones con la variable dependiente ( $C_{NH_3-ZA}$ ) se observaron otras correlaciones significativas de interés entre las demás variables, que se detallan a continuación.

La velocidad del aire en la zona animal ( $V_{INZA}$ ) está condicionada, y en parte originada, por el funcionamiento del ventilador ( $V_{EX}$ ), relación que obtiene una correlación positiva de 0,31 para 25°C.

Por otro lado, se observa una alta correlación entre la  $C_{CO_2-ZA}$  y la  $HR_{ZA}$  con un  $R = 0,86$  y  $0,52$  para 26 y 25°C respectivamente, muestra de la interacción entre ambos gases. Estos valores se encuentran dentro del rango de  $r_{ho} = 0,57-0,83$  establecido por Jeppsson (2002) y por encima del valor de  $R = 0,58$  establecido por Kaasik y Maasikments (2013) en alojamientos de vacuno de leche, donde además establece que valores de humedad relativa altos están acompañados de una concentración alta de  $CO_2$ . Además, la Figura 50 muestra como la mayoría de los valores de  $HR_{ZA}$  se encuentran entre el 50 y el 70% y la concentración de  $C_{CO_2-ZA}$  por debajo de las 4000 ppm. Esta relación facilita la anticipación a la hora de la estimación de  $CO_2$ , es decir cuando el valor de la  $HR_{ZA}$  se encuentre estos valores es altamente probable que la  $C_{CO_2-ZA}$  esté por debajo de las 4000 ppm.



**Figura 50. Concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) frente a la HR en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y correlación lineal obtenida entre ambas variables.**

La  $C_{CO_2-ZA}$  está menos condicionada por la ventilación que la  $C_{NH_3-ZA}$ , alcanzando valores de correlación con la  $V_{EX}$  de -0,70 y -0,47 para 26°C y 25°C respectivamente. Esto es debido a las distintas densidades de ambos gases y que produce la acumulación en la parte baja del alojamiento del  $CO_2$ , mientras que el  $NH_3$  sube y se extrae con mayor facilidad. La  $C_{CO_2-ZA}$  también está correlacionada con la  $T_{PEX}$  con un  $R$  de -0,76

y -0,42 para 26 y 25°C respectivamente, pero no con la temperatura en la zona animal ( $T_{ZA}$ ) como encontró Jeppsson (2002) con un intervalo de  $R = 0,42 - 0,83$ .

La  $T_{PEX}$  presentó correlaciones con  $V_{EX}$  0,60 y 0,28 para 26 y 25°C respectivamente. En la anterior variable, se observó además una correlación de -0,74 con  $HR_{ZA}$  para el grupo de 26°C, resultado similar al obtenido por Seedorf *et al.* (1998a) con un  $R = -0,80$  entre la temperatura media y la HR, medidas en diferentes puntos y para distintos alojamientos ganaderos. Para la temperatura de consigna de 25°C, aunque muy significativa ( $p < 0,01$ ), la relación fue mucho menor ( $R = 0,20$ ).

La  $HR_{ZA}$  también se muestra relacionada con la  $V_{EX}$  con un  $R$  de -0,44 para la temperatura de consigna de 26°C. Ni *et al.* (2017) también estableció una fuerte correlación inversa entre la ventilación y la HR.

Las correlaciones con la actividad animal son generalmente muy bajas y poco significativas. Para la temperatura de consigna de 26°C sólo se obtuvieron correlaciones significativas con las temperaturas. Con la  $T_{PEX}$  se obtuvo una correlación de  $R = -0,3$  y -0,25 para la  $AA_L$  y  $AA_M$  respectivamente, mientras que con la  $T_{ZA}$  se obtuvo una correlación de  $R = -0,59$  para ambas actividades. Para la temperatura de consigna de 25°C, también se obtuvieron valores de correlación significativos con las temperaturas, aunque bastante más bajos en valor absoluto. Con  $T_{PEX}$  se obtuvieron correlaciones de 0,13 y 0,15 para la  $AA_L$  y  $AA_M$  respectivamente, y con la  $T_{ZA}$  fueron hallados valores de  $R = 0,36$  para la  $AA_L$  y 0,38 para la  $AA_M$ . Además, se obtuvo una correlación significativa con  $V_{EX}$  ( $R = 0,16$  y 0,20 para  $AA_L$  y  $AA_M$  respectivamente) siendo mucho más baja que la encontrada por Blanes *et al.* (2008) que mostró un  $R^2$  de 0,73. Con respecto a la  $HR_{ZA}$  la correlación obtenida ( $R = 0,24$  y 0,17 para  $AA_L$  y  $AA_M$  respectivamente) es menor que la observada por Jeppsson (2002) con  $R = 0,57-0,85$ .

Se contrastó la significación de la diferencia entre los valores del coeficiente de correlación obtenidos a partir de los dos grupos (temperatura de consigna 26°C y de 25°C) mediante la transformación Z de Fisher, para las variables  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$ ,  $VIN_{ZA}$ ,  $V_{EX}$ , y  $T_{PEX}$ , lo cual proporcionó los resultados de la Tabla 39. En ella se observa que el estadístico Z fue mayor que 1,96, por lo que se rechazó la hipótesis nula, es decir, que la diferencia entre los coeficientes de correlación de ambos grupos es estadísticamente significativa. Por tanto, la elaboración de modelos lineales se realizará con los dos grupos de forma separada.

**Tabla 39. Estadístico (Z) para contrastar la significación de la diferencia entre los coeficientes de correlación entre las variables para los dos grupos según la temperatura de consigna.**

Variables	Z
$C_{CO_2-ZA}$	7,79
$HR_{ZA}$	7,57
$VIN_{ZA}$	3,04
$V_{EX}$	1,14
$T_{PEX}$	6,85

#### 5.2.4 Modelos de regresión lineal de $C_{NH_3-ZA}$ para $T_C$ de 26 y 25°C.

La regresión lineal entre las variables independientes y la  $C_{NH_3-ZA}$  para una temperatura de consigna de 26°C se muestra en la Tabla 40; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** No se han tenido en cuenta las variables con correlaciones no significativas,  $VIN_{ZA}$ ,  $T_{ZA}$  y  $AA_L$  y  $AA_M$ . Las variables se han seleccionado en función del valor de correlación, comenzando por modelos de regresión lineal simple con la  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $V_{EX}$ ,  $T_{PEX}$ , y  $HR_{ZA}$ . El análisis de colinealidad realizado mediante los valores de la tolerancia (T) y el Factor de Inflación de la Varianza (FIV) mostrados en la Tabla 40 muestra que ninguno de los modelos presenta colinealidad entre las variables integrantes. Tampoco se observa autocorrelación en los modelos según indica el estadístico de Durbin Watson. Los modelos son significativos e indican que existe relación lineal significativa. La significatividad de cada variable se explica en cada modelo.

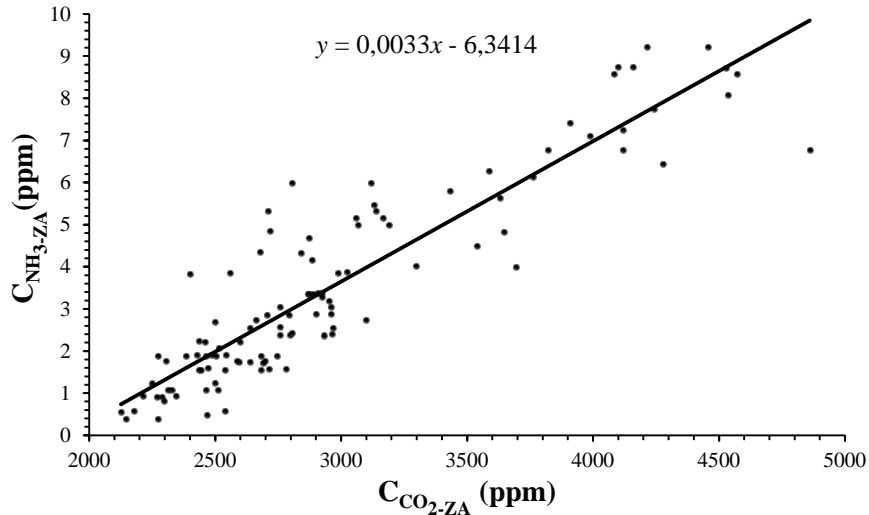
**Tabla 40.** Coeficientes no estandarizados (B), coeficientes estandarizados ( $\beta$ ), constante (CTE), coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), error estándar (SE), estadísticos de colinealidad (T' y VIF) y estadístico de Durbin Watson (DW) para la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$  a partir de regresiones múltiples con las variables (V):  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$ ,  $V_{EX}$  y  $T_{PEX}$ , para datos horarios y temperatura de consigna de 26°C.

M	V	B	$\beta$	CTE	R	$R^2$ ajust	SE	T'	VIF	DW
1	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,91	-6,34	0,91	<b>0,83**</b>	0,97	1,00	1,00	1,70
2	$HR_{ZA}$	0,30**	0,78	-13,44	0,78	<b>0,60**</b>	1,49	1,00	1,00	1,72
3	$T_{PEX}$	-0,26**	-0,74	8,63	0,80	<b>0,64**</b>	1,41	1,00	1,00	1,80
4	$V_{EX}$	-10,59**	-0,72	7,96	0,72	<b>0,52**</b>	1,63	1,00	1,00	2,01
5	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,93	-6,03	0,91	<b>0,83**</b>	0,98	0,26	3,82	1,70
	$HR_{ZA}$	-0,01	-0,03					0,26	3,82	
6	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,71	1,65	0,93	<b>0,86**</b>	0,89	0,43	2,34	1,80
	$T_{PEX}$	-0,39**	-0,27					0,43	2,34	
7	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,80	-4,15	0,92	<b>0,84**</b>	0,94	0,50	1,98	1,70
	$V_{EX}$	-2,34**	-0,16					0,50	1,98	
8	$T_{PEX}$	-0,74**	-0,50	5,78	0,85	<b>0,71**</b>	1,26	0,45	2,28	1,85
	$HR_{ZA}$	0,16**	0,40					0,45	2,28	
9	$C_{CO_2-ZA}$	,00**	0,63	2,91	0,87	<b>0,87**</b>	0,86	0,33	3,07	1,80
	$T_{PEX}$	-0,36**	-0,25					0,42	2,38	
	$V_{EX}$	-1,92**	-0,13					0,50	2,02	
10	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,80	4,05	0,88	<b>0,78**</b>	0,87	0,23	4,35	1,83
	$T_{PEX}$	-0,43**	-0,30					0,40	2,53	
	$HR_{ZA}$	-0,05	-0,13					0,24	4,13	
11	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,67	3,53	0,93	<b>0,86**</b>	0,86	0,13	7,83	1,80
	$T_{PEX}$	-0,38**	-0,26					0,36	2,77	
	$HR_{ZA}$	-0,02	-0,04					0,18	5,66	
	$V_{EX}$	-1,70	-0,12					0,36	2,76	

\*  $p \leq 0,05$ . \*\*  $p \leq 0,01$

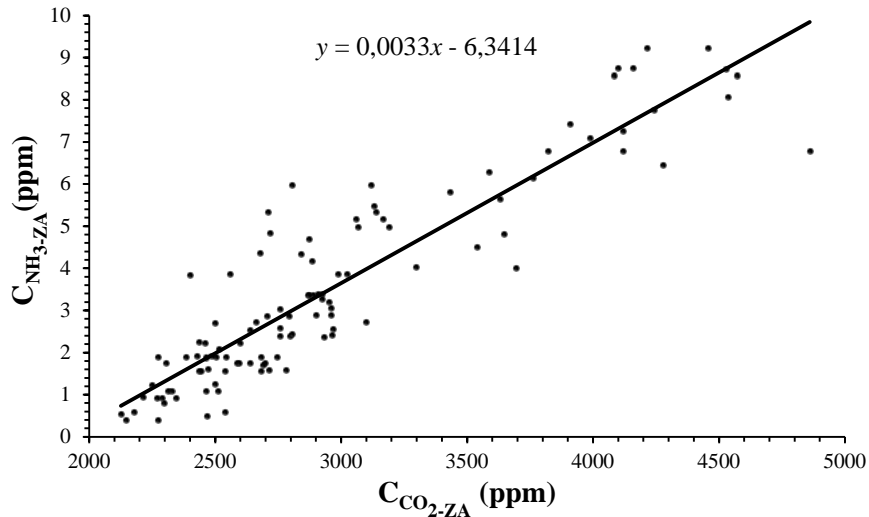
Los cuatro primeros modelos son de regresión lineal simple, todos ellos muy significativos ( $p \leq 0,01$ ). El primer modelo, que plantea la introducción de  $C_{CO_2-ZA}$  y la  $C_{NH_3-ZA}$ , (Figura 51) obtuvo un valor de  $R^2$  ajustado de 0,83, lo cual significa que la evolución de la variable  $C_{NH_3-ZA}$  se puede explicar en un 83% en función del valor de la

$C_{CO_2-ZA}$ . El error típico de la estimación obtenido es de 0,97 ppm, valor más que aceptable teniendo en cuenta que la mayor parte de los sensores no permiten esta precisión. El nivel de significancia alcanzado por las variables ( $p \leq 0,01$ ) indica que la relación existente entre las dos variables es muy significativa y no es debida al azar. A partir de los coeficientes no estandarizados, B, se obtiene la recta de regresión con la cual se puede modelar la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$ .



**Figura 51.** Concentración de  $NH_3$  en zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ) frente a la concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y correlación lineal obtenida entre ambas variables.

El segundo modelo toma como variable independiente la  $HR_{ZA}$ , obteniendo un  $R^2$  de 0,60. Por lo tanto se produce un descenso del 13% de la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por la recta de regresión con un error de 1,49 ppm lo cual indica un peor ajuste comparado con el anterior modelo. Sin embargo, esta relación resulta útil para la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$  ya que, su valor está por debajo de 6 ppm cuando la  $HR_{ZA}$  se mantiene entre 50 y el 60% (Figura 52). Por lo tanto, alcanzar un valor de humedad adecuado garantiza bajas concentraciones de  $NH_3$ .



**Figura 52. Concentración de  $\text{NH}_3$  en zona animal ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) frente a la concentración de HR en zona animal ( $HR_{\text{ZA}}$ ) y correlación lineal obtenida entre ambas variables.**

El modelo 3, entre la  $T_{\text{PEX}}$  y la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ , con un  $R^2$  de 0,64 y un error típico de la estimación de 1,41 ppm, apenas presenta una mejora en la predicción de la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ , con respecto al modelo anterior. Sin embargo, puede ser interesante por incluir como variable una temperatura de fácil medición. El último modelo de regresión lineal de única variable (4) donde la  $V_{\text{EX}}$  es la variable independiente, presenta los peores resultados, es decir explica menos porcentaje de la variabilidad de la variable dependiente ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ), con un  $R^2$  de 0,52 y un error de 1,63 ppm.

A partir del modelo 5 inclusive, se presentan los resultados de la regresión lineal múltiple. Se trató de buscar modelos que tuviesen un nivel de explicación mayor sobre la variabilidad de la variable dependiente ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) y un ajuste mayor y por lo tanto una mejora en la predicción con respecto a los modelos de regresión simple. Tomando el primer modelo, variable independiente  $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$ , se introdujo la  $HR_{\text{ZA}}$  sin que se observe un incremento de  $R^2$ , el cual se mantiene constante (0,83). Si se observan los coeficientes estandarizados ( $\beta$ ), el efecto de la  $HR_{\text{ZA}}$  es prácticamente despreciable (-0,03), además de no significativo ( $p > 0,05$ ), por lo que se debe descartar este modelo. La introducción de la  $T_{\text{PEX}}$  (modelo 6) produce un aumento en el  $R^2$  (0,86) y un error de 0,89 ppm. Cuando se incluye la  $V_{\text{EX}}$  (modelo 7) se produce un ligero incremento de  $R^2$  (0,84) con respecto al modelo 1 y el error en la estimación es algo menor (0,94). Los

coeficientes estandarizados siguen mostrando un efecto mayor de la variable  $C_{CO_2-ZA}$ . Los coeficientes estandarizados de los modelos de dos variables (5 – 7) muestran que la  $C_{CO_2-ZA}$  es la variable con más peso sobre la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$ .

Tomando el segundo modelo (variable independiente  $HR_{ZA}$ ), se introdujo la  $T_{PEX}$  para obtener el modelo 8, con un aumento significativo de  $R^2$  (0,71) y un descenso del error de la estimación (1,26 ppm). Los coeficientes estandarizados indican que el efecto de la variable  $HR_{ZA}$  es ligeramente mayor que el de la  $T_{PEX}$ , sobre la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$ .

El modelo 9, con  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $T_{PEX}$  y  $V_{EX}$  como variables predictoras o independientes, presenta el mayor  $R^2$  (0,87) y con el menor error de la estimación (0,86 ppm). Los coeficientes estandarizados indican que la  $C_{CO_2-ZA}$  tiene el mayor efecto sobre  $C_{NH_3-ZA}$  (0,63), seguido de la  $T_{PEX}$  (-0,25) y  $V_{EX}$  (-0,13). Tanto el modelo 10 como el 11, donde se incorpora la  $HR_{ZA}$ , deben ser rechazados ya que ésta variable no es significativa ( $p > 0,05$ ).

Por lo tanto, podemos concluir que los mejores modelos son siempre los que incorporan la variable  $C_{CO_2-ZA}$  sola, o acompañada de otras variables. Aunque el modelo 9, teóricamente presenta los mejores resultados con el mayor  $R^2$  (0,87) y el menor error en la estimación de la variable dependiente (0,86), desde el punto de vista práctico conviene elegir el modelo 1, ya que a la hora de realizar la estimación real, resultan más interesantes y factibles los modelos que presenten menor número de variables y que éstas sean de fácil medición. El modelo 6, que incorpora la  $T_{PEX}$  además del  $C_{CO_2-ZA}$ , también resulta un modelo de fácil medición, mejorando además el ajuste, obteniendo un  $R^2$  de 0,86 y un error de la estimación de 0,87 ppm.

La Tabla 41 muestra los modelos de regresión lineal entre las variables independientes y la  $C_{NH_3}$  para una temperatura de consigna de 25°C. Todos los modelos fueron significativos y no presentaron problemas de colinealidad ni de autocorrelación.

**Tabla 41. Coeficientes no estandarizados (B), coeficientes estandarizados ( $\beta$ ), constante (CTE), coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), error estándar (SE), estadísticos de colinealidad (T' y VIF) y estadístico de Durbin Watson (D.W.) para la estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$  a partir de regresiones múltiples con las variables (V):  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$ ,  $VIN_{ZA}$ ,  $V_{EX}$ , y  $HR_{ZA}$  para datos horarios y temperatura de consigna de 25°C.**

M	V	B	$\beta$	CTE	R	$R^2$ ajust.	SE	T'	VIF	D.W.
1	$V_{EX}$	-14,57**	-0,65	12,55	0,65	0,42**	1,81	1,00	1,00	1,81
2	$V_{EX}$	-11,20**	-0,50	4,70	0,71	0,50**	1,69	0,78	1,29	1,90
	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,32					0,78	1,29	
3	$V_{EX}$	-10,18**	-0,49	5,29	0,72	0,51**	1,65	0,73	1,37	1,88
	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,31					0,78	1,29	
	$VIN_{ZA}$	-58,33**	-0,16					0,91	1,11	
4	$V_{EX}$	-9,80**	-0,43	9,86	0,73	0,53**	1,63	0,72	1,40	1,90
	$C_{CO_2-ZA}$	0,00**	0,40					0,58	1,74	
	$VIN_{ZA}$	-62,25**	-0,17					0,90	1,11	
	$HR_{ZA}$	-0,11**	-0,14					0,71	1,40	

\*  $p \leq 0,05$ . \*\*  $p \leq 0,01$

Las variables se han seleccionado en función del valor de correlación, comenzando por la introducción de  $V_{EX}$ , la cual presenta la mayor correlación con  $C_{NH_3-ZA}$  (modelo 1) con un  $R^2$  de 0,42, frente al encontrado por Blanes *et al.* (2008) de 0,61. A continuación se ha incorporado la variable  $C_{CO_2-ZA}$ , mejorando el modelo ligeramente ( $R^2 = 0,50$ ), con un error de la estimación menor (1,69 ppm). En este modelo la variable  $V_{EX}$  tiene mayor efecto sobre la variable dependiente que la  $C_{CO_2-ZA}$ . En el modelo 3 se incorporó la  $VIN_{ZA}$  con apenas variación en el  $R^2$  (0,51), pero se observó un error de la estimación menor (1,65 ppm). La incorporación de la  $HR_{ZA}$  en el modelo 4 no produce incrementos importantes en  $R^2$  (0,53). Esto indica que la ventilación es clave en la determinación y predicción de la  $C_{NH_3-ZA}$ . Tanto la  $V_{EX}$  como la  $C_{CO_2-ZA}$  producen un efecto mayor sobre la variabilidad de la  $C_{NH_3-ZA}$  frente a la  $VIN_{ZA}$  y  $HR_{ZA}$  presentes en el modelo. Por presentar el  $R^2$  mayor (0,53) y el menor error típico de la estimación, el modelo 4 presenta el mejor ajuste. Por tanto, la incorporación de la variable de  $HR_{ZA}$  en el control de la ventilación daría como resultado un control indirecto sobre la  $C_{NH_3-ZA}$ .

Blanes *et al.* (2008) también consideraron la ventilación como factor clave y, a través del estudio de otras variables como el material del suelo (silo de maíz o paja), la actividad animal, temperatura exterior, producción de calor y tiempo (día o noche), determinaron varios modelos para la predicción de la  $C_{NH_3-ZA}$ , entre ellos, el modelo que integra el flujo de ventilación, la actividad animal y el tipo de material de suelo con un  $R^2 = 0,61$ .

Como se puede observar, se produce una disminución del grado de correlación y consecuentemente diferentes modelos de regresión entre las variables medidas para la temperatura de consigna de 26 y 25°C. Este hecho no es debido a una sola razón en concreto, si no a la combinación de diferentes factores causados por la propia dinámica del ambiente climático en el interior de la sala. Las concentraciones medias de  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  son mayores para la temperatura de consigna de 25°C, un 7%  $C_{CO_2-ZA}$  y un 33% para la  $C_{NH_3-ZA}$ , debido al crecimiento del animal. Durante el crecimiento del animal se produce un aumento de peso exponencial, aumentan los consumos de pienso y agua y se produce una mayor eliminación de urea a través de la orina y heces, que transforma el nitrógeno en  $NH_3$ , por lo que se libera una concentración cada vez mayor. Predicala *et al.* (2016) observaron también como la producción de  $NH_3$  aumenta con el crecimiento del lechón. En el caso del  $CO_2$ , se produce un aumento menor que también fue observado por Pedersen *et al.* (2008) que establecieron que la producción de  $CO_2$  de los lechones es mucho más baja que para los cerdos en etapas de finalización. Además, la respuesta dinámica del  $NH_3$  no es igual a la del  $CO_2$ . Ni *et al.* (2000) observaron una diferencia en el tiempo de respuesta de ambas variables a la ventilación, observándose un retraso de hasta una hora para la  $C_{NH_3}$ . Este retraso puede ser explicado porque la producción de  $NH_3$  (Figura 3), depende de diversos factores como el tipo de suelo, la dieta del animal o la temperatura del purín (Predicala *et al.*, 2016). Además la liberación del  $NH_3$  es un proceso complejo. Ni *et al.* (2000) observaron una fuerte influencia de la liberación de  $CO_2$  en la liberación de  $NH_3$ , de modo que, cuando aumentaba la liberación de  $CO_2$  aumentaba el pH que actuó como factor acelerador de la liberación de  $NH_3$ .

Por otra parte, para la temperatura de consigna de 25°C se aumentó la tasa mínima de ventilación, lo que produce menos picos en las concentraciones de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub> y menos valores extremos. Aunque las concentraciones sean mayores que para el grupo de 26°C, este aumento en la tasa mínima de ventilación produce tiempos de respuesta diferentes para todas las variables estudiadas, lo que hace difícil que muestren la misma variación lineal en el tiempo.

### **5.2.5 Modelos de regresión lineal de la $C_{NH_3-ZA}$ a partir de datos medios de otras variables para $T_C$ de 26 y 25°C.**

Los sensores electroquímicos empleados, siendo adecuados para su uso en alojamientos ganaderos, muestran diversos problemas entre los que destacan la saturación en exposiciones prolongadas, el mantenimiento regular y la escasa sensibilidad. Las dos primeras cuestiones han sido minimizadas al emplear el equipo en un periodo de tiempo reducido, con las labores de mantenimiento necesarias. Sin embargo, la sensibilidad es un parámetro inherente al sensor que afecta fundamentalmente a mediciones de concentraciones bajas. Para mejorar la exactitud de los datos y aproximarnos más al valor real, se ha considerado que cada día con la misma temperatura de consigna, era una repetición de la medida. Bajo esta consideración, se elaboraron dos días tipo, uno para cada temperatura de consigna (26 y 25°C), calculando media horaria de todos los días, lo cual dio lugar a valores más indicativos de la variación diaria.

La Tabla 42 muestra los modelos de regresión lineal obtenidos para los dos grupos. Todos los modelos mostrados son significativos, ya que los no significativos se han descartado, y ninguno muestra colinealidad entre las variables. Además todos presentan valores de error menores que para los modelos horarios anteriormente estudiados.

**Tabla 42. Coeficientes no estandarizados (B), coeficientes estandarizados ( $\beta$ ), constante (CTE), coeficiente de correlación (R), coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), error estándar (SE) estadísticos de colinealidad (T' y VIF) y estadístico de Durbin Watson (DW) para la estimación de  $C_{NH_3-ZA}$  a partir de regresión lineal con las variables (V):  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $HR_{ZA}$ ,  $V_{EX}$ ,  $T_{PEX}$  y  $HR_{ZA}$  para datos medios horarios por grupo de temperatura de consigna ( $T_C = 26$  y  $25^\circ C$ ).**

$T_C = 26^\circ C$	V	B	$\beta$	CTE	R	$R^2$	SE	T'	VIF	DW
26-1	$C_{CO_2-ZA}$	4E-03**	0,82	-7,14	0,82	0,66**	0,78	1,00	1,00	1,50
26-2	$HR_{ZA}$	0,37**	0,70	-17,34	0,69	0,46**	0,99	1,00	1,00	1,55
26-3	$T_{PEX}$	-1,12**	-0,89	20,30	0,89	0,79**	0,62	1,00	1,00	1,56
26-4	$V_{EX}$	-19,78**	-0,79	11,85	0,79	0,60**	0,87	1,00	1,00	1,86
26-5	$C_{CO_2-ZA}$	1E-03	0,31	11,70	0,91	0,82**	0,58	0,37	2,71	1,74
	$T_{PEX}$	-0,81	-0,65					0,37	2,71	
26-6	$C_{CO_2-ZA}$	2E-03*	0,54	1,04	0,89	0,76**	0,66	0,57	1,75	2,32
	$V_{EX}$	-10,83**	-0,43					0,57	1,75	
26-7	$HR_{ZA}$	0,12*	0,23	10,57	0,91	0,82**	0,58	0,63	1,60	1,78
	$T_{PEX}$	-0,94**	-0,75					0,63	1,60	
26-8	$HR_{ZA}$	0,22**	0,41	-2,58	0,87	0,72**	0,72	0,77	1,31	2,52
	$V_{EX}$	-14,81**	-0,60					0,77	1,31	
26-9	$T_{PEX}$	-0,91**	-0,73	10,33	0,91	0,81**	0,59	0,38	2,66	1,82
	$V_{EX}$	-0,60**	-0,02					0,45	2,23	
	$HR_{ZA}$	0,13*	0,24					0,62	1,61	
$T_C = 25^\circ C$	V	B	$\beta$	CTE	R	$R^2$	SE	T	VIF	DW
25-1	$V_{EX}$	-18,97**	-0,85	14,80	0,85	0,71**	1,04	1,00	1,00	1,73
25-2	$T_{PEX}$	-2,55**	-0,84	33,13	0,84	0,70**	0,87	1,00	1,00	1,49
25-3	$V_{EX}$	-17,49**	-0,79	4,88	0,87	0,73**	0,82	0,87	1,15	2,02
	$C_{CO_2-ZA}$	3E-03*	0,18					0,87	1,15	
25-4	$C_{CO_2-ZA}$	6E-03**	0,37	13,34	0,92	0,83**	0,65	0,99	1,02	1,72
	$T_{PEX}$	-2,41**	-0,80					0,99	1,02	
25-5	$T_{PEX}$	-2,90**	-0,96	36,51	0,92	0,83**	0,66	0,90	1,11	2,14
	$AA_M$	0,04**	0,38					0,90	1,11	
25-6	$V_{EX}$	-21,50**	-0,97	15,59	0,92	0,84**	0,64	0,91	1,10	2,88
	$AA_M$	0,04**	0,37					0,91	1,10	
25-7	$V_{EX}$	-11,94**	-0,54	26,82	0,95	0,88**	0,55	0,20	5,05	2,92
	$T_{PEX}$	-1,47**	-0,49					0,20	5,07	
	$AA_M$	0,05**	0,40					0,90	1,11	
25-8	$T_{PEX}$	-2,67**	-0,89	22,25	0,94	0,86**	0,59	0,38	2,66	2
	$C_{CO_2-ZA}$	4E-03**	0,24					0,45	2,23	
	$AA_M$	0,03*	0,23					0,62	1,61	

\*  $p \leq 0,05$ . \*\*  $p \leq 0,01$

Para la temperatura de consigna de 26°C, se observa un descenso del valor de  $R^2$  para los modelos 26-1 y 26-2, que relacionan la  $C_{NH_3-ZA}$  con la  $C_{CO_2-ZA}$  y la  $HR_{ZA}$ , para los modelos 26-3 y 26-4 donde las variables predictoras son la  $T_{PEX}$  y la  $V_{EX}$  se produce un aumento de  $R^2$  bastante significativo. Los modelos con dos variables muestran  $R^2$  similares a los modelos de regresión con datos horarios. En general, se obtuvo una mayor exactitud en la predicción de la  $C_{NH_3-ZA}$  con estos nuevos modelos, ya que, aunque no presenten valores de correlación más altos, poseen errores más bajos en la predicción de  $C_{NH_3}$ .

Para la temperatura de consigna de 25°C, los resultados muestran una clara mejora con respecto a los datos horarios. El empleo de las medias dio lugar a una mayor exactitud que, a las bajas concentraciones de amoníaco obtenidas durante esta temperatura de consigna, supuso una notable mejora en los modelos lineales.

El modelo 25-1, que toma como variable predictoras la  $V_{EX}$ , muestra un  $R^2$  más alto que para el mismo modelo con datos horarios. Al contrario que para los modelos de regresión anteriores basados en la  $V_{EX}$  como única variable, en éstos se incluye la  $T_{PEX}$  como variable fundamental en la predicción de  $C_{NH_3-ZA}$  con un  $R^2$  de 0,70 (modelo 25-2). Si se agrega la  $C_{CO_2-ZA}$  al modelo 25-1 se produce un ligero aumento del  $R^2$  (modelo 25-3). El modelo 25-4, que toma como variables predictoras la  $C_{CO_2-ZA}$  y la  $T_{PEX}$ , presenta un ajuste mucho mejor, con un  $R^2$  de 0,83 y un error mucho menor.

Por otro lado, la inclusión de la  $AA_M$  (modelos 25-5 y 25-6 respectivamente) mejora los modelos de regresión lineal, sobre todo para el modelo que incorpora la  $V_{EX}$  y  $AA_M$  con  $R^2 = 0,84$ . En el modelo 25-7, formulado con las variables  $V_{EX}$ ,  $T_{PEX}$  y  $AA_M$ , todas tienen un peso muy similar, aumentando el valor de  $R^2$  (0,88) y reduciendo el error en la predicción (0,55). El modelo 25-8 con un  $R^2 = 0,86$  y con un error de 0,46 empeora el ajuste del anterior, presentando el mejor ajuste para la predicción de la  $C_{NH_3-ZA}$ . Realizar una estimación de la  $C_{NH_3-ZA}$  con un modelo de regresión simple basado únicamente en la variable la  $AA_M$  no es posible, sin embargo resulta interesante su inclusión en modelos con otras variables como temperatura y ventilación. Blanes *et al.* (2008) muestra un modelo de regresión lineal múltiple entre las variables ventilación, actividad animal y tipo de suelo con un  $R^2 = 0,80$ . Además aunque la  $AA$  no muestre una relación

lineal directa con la  $C_{NH_3}$ , sí se observó que picos de actividad máxima coinciden con picos de máxima  $C_{NH_3}$  para ambas temperaturas de consigna. Por otro lado, la inclusión de la AA como predictora se produce a una temperatura de consigna de 25°C y no de 26°C, lo cual está relacionado con un cambio en el comportamiento animal producido entre ambas temperaturas de consigna (Figura 49). El cambio de un perfil en camello para la temperatura de 25°C a un perfil en dromedario a 26°C, más acorde con la evolución de la concentración de amoníaco permite la inclusión de esta como variable. Por tanto, la influencia de la actividad animal estará en función de la edad de mismo que varía en la etapa de destete, tal y como apuntan Besteiro *et al.* (2017).

En resumen, los modelos mostraron mejores resultados, lo que en parte pone de manifiesto la falta de precisión del sensor, y la necesidad de la búsqueda de mediciones indirectas de la  $C_{NH_3}$ , ya que en la práctica resultaría muy costoso la incorporación de sistemas más precisos. Se sigue observando la misma tendencia de correlaciones más bajas entre las variables  $V_{EX}$ ,  $HR_{ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  para la temperatura de consigna de 25°C. Para ambos grupos destacan los modelos que incorporan las variables  $T_{PEX}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  y  $V_{EX}$  para la predicción de  $C_{NH_3-ZA}$ . Los modelos basados en la  $T_{PEX}$  son válidos para ambas temperaturas de consigna y además a nivel práctico resulta un método eficaz y económico para el ganadero, con muy buenos resultados tanto en error, como en ajuste. Además surge el modelo basado en  $T_{PEX}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  (26-5 y 25-4) que presentan ligeras mejoras con respecto al anterior y, aunque más complejo, puede resultar de utilidad práctica.

### 5.3 EVOLUCIÓN DIARIA DE LAS CONCENTRACIONES DE NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub> Y HR EN ZONA ANIMAL.

En este trabajo se analizó la evolución diaria de las concentraciones de NH<sub>3</sub> y CO<sub>2</sub>, así como de la humedad relativa para un ciclo de postdestete de lechones entre el 2 y el 17 de marzo de 2013. Los días en los que se cambió la temperatura de consigna definida, no se consideraron en el análisis debido a que el funcionamiento del sistema de ventilación estuvo controlado en función de dos temperaturas diferentes. Los días analizados se agruparon de acuerdo con las temperaturas de consigna establecidas, las cuales oscilaron entre 26° y 23°C para el ciclo completo, disminuyendo con la edad de los lechones, siendo de 26 y 25°C para el período estudiado.

#### 5.3.1 Evolución diaria de la concentración de amoníaco en la zona animal

Debido a la alta volatilidad del gas, la evolución de la  $C_{NH_3-ZA}$  se vio muy afectada por la ventilación, afectada a su vez por las temperaturas de consigna definidas para el control ambiental. En Tabla 43 se muestran los distintos estadísticos obtenidos para la concentración de amoníaco en función de la temperatura de consigna establecida en el interior.

**Tabla 43. Valor medio (Med.), máximo (Máx.), mínimo (Mín.) y desviación estándar (SD) de la concentración de NH<sub>3</sub> en la zona animal, ( $C_{NH_3-ZA}$ ) según temperatura de consigna ( $T_c$ ).**

$T_c$ (°C)	$C_{NH_3-ZA}$ (ppm)			
	Med.	Máx.	Mín.	SD
26	3,79	6,84	1,38	1,49
25	5,24	7,82	2,45	1,52

El efecto de la temperatura de consigna en la  $C_{NH_3-ZA}$  estaba directamente relacionado con el efecto de la temperatura de consigna en la ventilación y, en consecuencia, con la eliminación de NH<sub>3</sub> del alojamiento. La  $C_{NH_3}$  fue mayor para la temperatura de consigna de 25°C, con un valor medio de 3,79 ppm y 5,24 ppm para las temperaturas de consigna 26°C y 25°C, respectivamente. Esto es debido a que, durante los primeros días del ciclo de postdestete, que se corresponden con el período crítico (Le Dividich & Herpin 1994), la ventilación estuvo fuertemente restringida en el

alojamiento debido a las estrictas necesidades térmicas para el crecimiento de los lechones y su susceptibilidad a las corrientes de aire. La dispersión de los datos definida por la desviación estándar es muy similar para ambas temperaturas de consigna, pero teniendo en cuenta los valores medios, para la temperatura de 26°C la variabilidad es mayor.

Tal y como se puede observar en la

Figura 53, durante el período estudiado se observaron las mayores concentraciones de  $C_{NH_3-ZA}$  por la noche, cuando se registraron las temperaturas más bajas. Las  $C_{NH_3-ZA}$  disminuyeron durante el día y alcanzaron el valor mínimo al mediodía, coincidiendo con la  $T_{PEX}$  media más alta. La evolución diaria de la  $C_{NH_3-ZA}$  presenta una cierta simetría con la variación diaria de la  $T_{PEX}$  media, por lo que se va a tratar de comprobar si su evolución, al igual que en el caso de la temperatura, responde a una función senoidal.

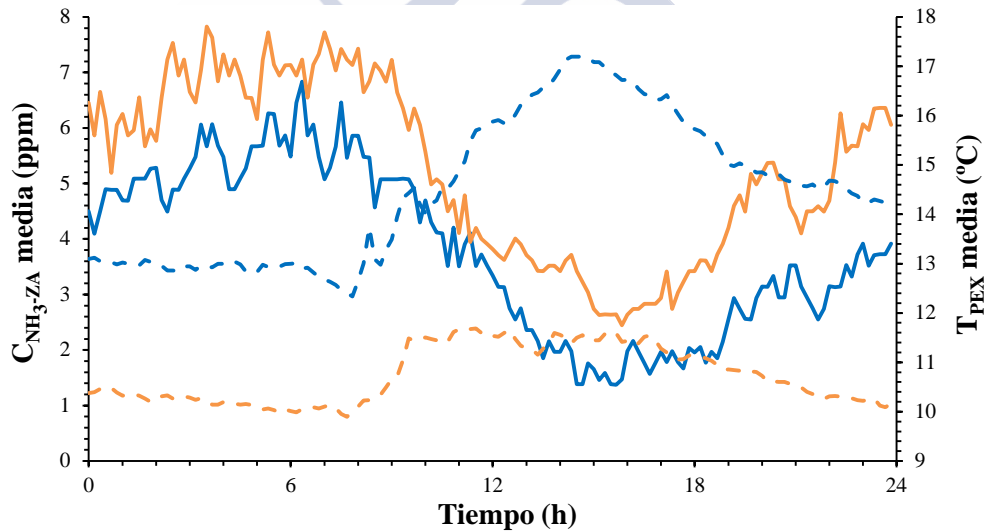


Figura 53. Evolución de los valores medios diez-minutales de la concentración de  $NH_3$  en zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ) (—) y la temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 26°C, y de la concentración de  $NH_3$  ( $C_{NH_3-ZA}$ ) (—) y la temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 25°C.

Para adaptar la evolución diaria de la  $C_{NH_3-ZA}$  a una función senoidal, se determinaron la amplitud (A), el ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) y el valor medio (B) de la onda senoidal. La Tabla 44 resume los valores obtenidos para cada temperatura de consigna (Figura 54).

**Tabla 44. Valores característicos de la curva senoidal de la concentración de  $NH_3$  en zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ): amplitud (A), y ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) y hora de inicio de la onda (Inicio) para**

**cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).**

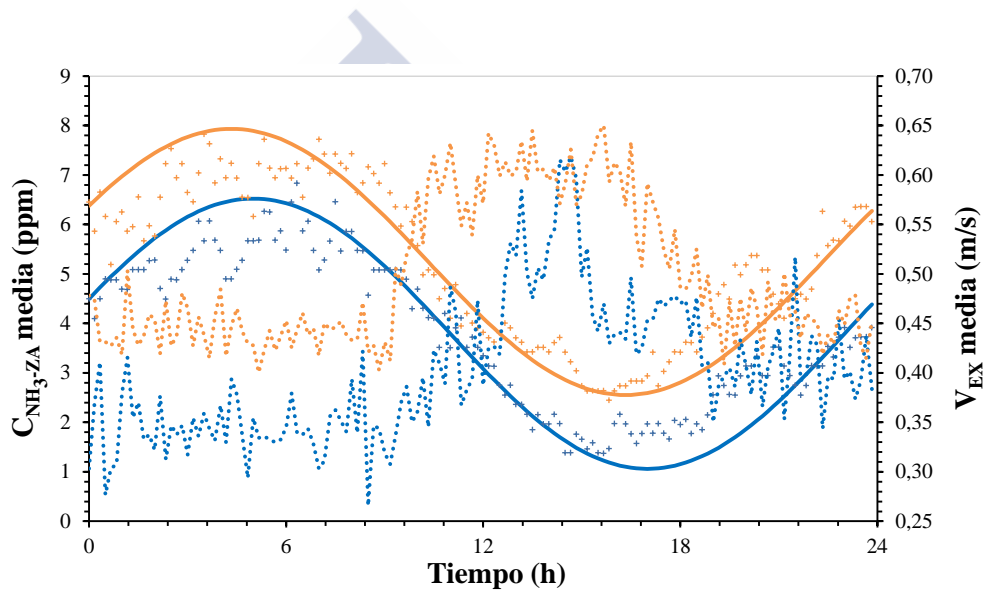
$T_C$ (°C)	A (ppm)	$\Phi$ (rad)	Inicio (h)
26	2,73	0,26	23:00
25	2,69	0,44	22:20

En la Figura 54 se observa un adelanto en la onda y una disminución en la amplitud de la función senoidal con la disminución de la temperatura de consigna, aunque apenas hubo diferencia entre los valores obtenidos, 0,26 y 0,44 rad y 2,73 y 2,69 ppm. La  $C_{NH_3-ZA}$  inicial se encontró por encima de su valor medio en un 19% y 22% para 26 y 25°C respectivamente.

Wang *et al.* (2011) obtuvieron una  $C_{NH_3-ZA}$  de  $0,83 \pm 0,68$  ppm para cerdos de cebo en suelos emparrillados con un peso inicial de 36,8 kg durante 22 días. Estos valores están por debajo de los valores obtenidos durante el período analizado en este trabajo. Las diferencias observadas están totalmente justificadas por las distintas etapas de crecimiento de los animales, el sistema de control de clima y de las condiciones climáticas de las pruebas realizadas. La evolución diaria de la  $C_{NH_3-ZA}$  difería considerablemente del patrón observado en condiciones de laboratorio para los cerdos en etapa de finalización de crecimiento. Durante el mismo, las  $C_{NH_3-ZA}$  fueron más altas antes de las 07:00 h, disminuyendo después por la eliminación diaria del estiércol por la mañana y aumentado de nuevo con el aumento de la temperatura hasta su valor máximo entre las 13:00 y las 14:00 h, para finalmente decrecer con la disminución de la temperatura (Wang *et al.*, 2011). Además, la eliminación diaria del estiércol llevada a cabo en el trabajo de Wang *et al.* (2011), afectó bruscamente a la evolución diaria de la  $C_{NH_3-ZA}$ , a diferencia de esta prueba experimental. En ella, el sistema de ventilación

eliminó de manera efectiva el  $\text{NH}_3$  al mediodía, evitando de esta manera una tendencia de  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  paralela a la tendencia de la temperatura del aire.

La evolución diaria de la  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  en alojamientos de postdestete mostró un patrón similar a la evolución que se encuentra en granjas de conejos (Calvet *et al.*, 2011a), con valores máximos por la noche, cuando las tasas de ventilación eran mínimas, y valores mínimos durante el día, cuando las tasas de ventilación eran máximas. Por lo tanto, en ambos casos, la respuesta senoidal estuvo fuertemente condicionada por las tasas de ventilación en el interior del edificio, las cuales son controladas en función de la temperatura interior.



**Figura 54. Evolución de los valores medios diez-minutales de la concentración  $\text{NH}_3$  en zona animal ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) medida (+) y modelizada (-) para la temperatura de consigna de  $26^\circ\text{C}$ , de la concentración de  $\text{NH}_3$  en zona animal ( $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ ) medida (+) y modelizada (-) para la temperatura de consigna de  $25^\circ\text{C}$  y de la  $V_{\text{EX}}$  para las temperaturas de  $26^\circ\text{C}$  (··) y  $25^\circ\text{C}$  (··).**

Las estadísticas que se resumen en Tabla 45 muestran la bondad de ajuste del patrón senoidal a los datos de la variación diaria de  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  en alojamientos de destete basados en la temperatura de consigna.

**Tabla 45. Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error medio (AE), desviación estándar del error (SDE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error medio relativo (RME) para el ajuste de la evolución diaria de la concentración de  $NH_3$  en la zona animal ( $C_{NH_3-ZA}$ ) a una curva senoidal para**

**las temperaturas de consigna ( $T_c$ ).**

$T_c$ (°C)	$R^2$	AE (ppm)	SDE (ppm)	RMSE (ppm)	RME (%)
26	0,93	2.29E-15	0,64	0,64	-5,00
25	0,88	4.44E-16	0,70	0,70	-1,00

El grado de ajuste de los datos a una función senoidal se caracteriza por el coeficiente de determinación,  $R^2$  en este caso se obtuvo un rango de valores de 0,93 y 0,88 para los puntos de ajuste de temperatura de 26 y 25°C, respectivamente y un valor de 0,92 para el total de los datos. Estos resultados fueron apoyados por otros estadísticos, entre los cuales el sesgo o error medio (AE) proporcionó subestimaciones leves con valores muy próximos a 0.

Sin embargo, la desviación estándar del error (SDE), que varió de 0,64 a 0,70, fue la principal componente del error, lo que puede explicarse por las variaciones aisladas en las mediciones con respecto a la onda teórica que se compensa en un periodo (un día).

Los errores medios relativos (RME) se encontraron entre -5% y -1%. Dados los bajos valores de AE, la RMSE se corresponde con el valor de la SDE. La onda senoidal para la  $C_{NH_3-ZA}$  en las granjas de cerdos proporciona un patrón fiable que podría implementarse para la estimación en tiempo real de la concentración de  $NH_3$  y ser incluida como un parámetro en las estrategias de control. Esto es particularmente relevante debido a la  $C_{NH_3}$  está relacionada con la temperatura de consigna, que es el elemento más importante del control climático.

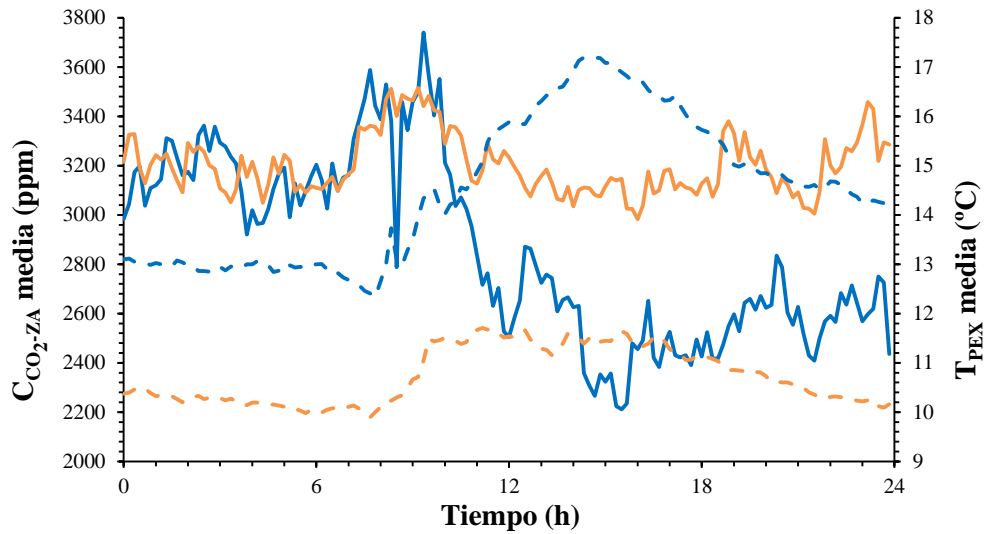
### 5.3.2 Evolución diaria de la concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal

La  $C_{CO_2}$  aumentó con la disminución de la temperatura de consigna, con valores de 2859,55 y 3201,61 ppm (Tabla 46) para temperaturas de consigna de 26°C y 25°C, respectivamente. Para ambas temperaturas los valores medios de la  $C_{CO_2}$  presentan poca dispersión siendo mucho menor para la temperatura de consigna de 25°C con una desviación estándar de 120,48 ppm.

**Tabla 46. Valor medio (Med.), máximo (Máx.), mínimo (Mín.) y desviación estándar (SD) para la concentración de CO<sub>2</sub> en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) para cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).**

$T_C$ (°C)	Med. (ppm)	Máx. (ppm)	Mín. (ppm)	SD (ppm)
26	2859,55	3740,73	2210,95	366,69
25	3201,61	3514,85	2982,63	120,48

En la Figura 55 se muestra que para la temperatura de consigna de 26°C los valores más altos de  $C_{CO_2}$  se produjeron durante la noche, alcanzando la máxima concentración a primeras horas de la mañana, en torno a las 09:00 h. La  $T_{PEX}$  media presenta una evolución contraria, produciéndose las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> cuando la  $T_{PEX}$  media es baja. Así mismo, cuando se incrementa la temperatura, la  $C_{CO_2}$  desciende. Para la temperatura de consigna de 25°C, la  $C_{CO_2}$  sigue una evolución similar a la de 26°C, con tres máximos, (1) entre las 8:00 y las 10:00 h, (2) a las 19:00 h, y (3) a las 23:00 h, coincidiendo con las temperaturas más bajas. Las  $C_{CO_2-ZA}$  más bajas se observaron a las horas centrales del día cuando las temperaturas fueron más altas y por la noche, entorno a las 21:00 h, cuando las temperaturas se encontraban en pleno descenso y ya alcanzaban valores bajos, en torno a 10,50°C (Figura 55).



**Figura 55. Evolución de los valores medios diez-minutales de CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2-ZA}$ ) (—) y la temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 26°C, y de la concentración de CO<sub>2</sub> ( $C_{CO_2-ZA}$ ) (—) y la temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 25°C.**

Se trató de adaptar la evolución diaria de la  $C_{CO_2-ZA}$  a una función senoidal, para lo cual se determinaron la amplitud (A) el ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) y el valor medio (B) de la onda. La Tabla 47 resume los valores obtenidos para cada temperatura de consigna (Figura 56).

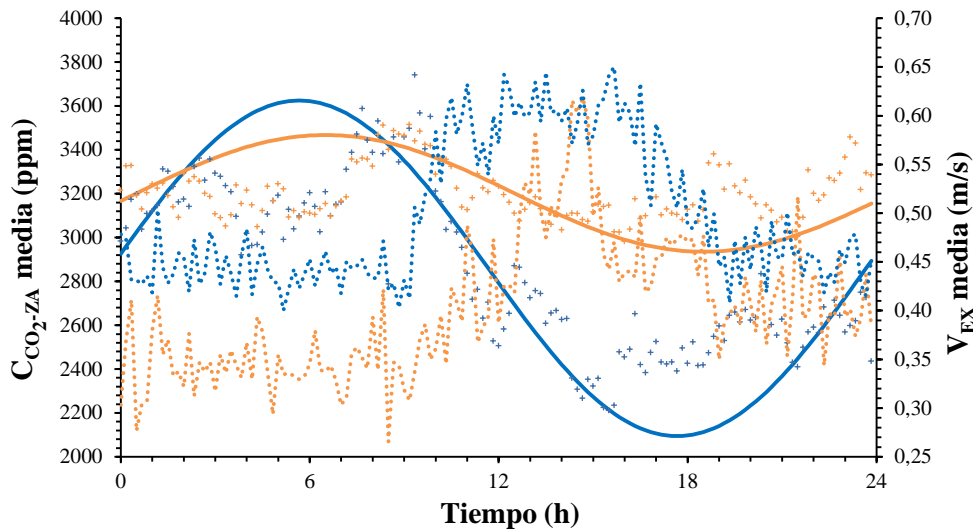
**Tabla 47. Valores característicos de la curva senoidal de la concentración de dióxido de carbono en la zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) para cada temperatura de consigna: amplitud (A), ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) y hora de inicio de la onda (Inicio) para cada temperatura de consigna.**

$T_c$ (°C)	A (ppm)	$\Phi$ (rad)	Inicio (h)
26	764,89	0,09	23:40
25	266,11	-0,13	00:30

En la Figura 56 se observa un ligero retraso en la onda y una disminución considerable de la amplitud para la temperatura de consigna de 25°C (Tabla 47). El ángulo de fase inicial fue positivo para las temperaturas de consigna de 26°C y negativo para 25°C (Tabla 47).

La evolución diaria de la  $C_{CO_2}$  mostró un patrón similar para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C, con valores más altos por la noche alcanzando el máximo a las 06:00 h para ambas temperaturas y con valores más bajos durante el día con valores

mínimos a las 18:00 h y a las 19:00 h para 26 y 25°C respectivamente. Estos resultados coinciden con la evolución en granjas de conejos (Calvet *et al.*, 2011a) con valores de concentración de  $C_{CO_2}$  más bajos por la noche alcanzando el máximo a las 05:00 h y con concentraciones más bajas por el día con valores mínimos a las a las 17:00 h. Por lo tanto, en ambos casos, y como sucedía con la  $C_{NH_3}$ , la respuesta senoidal estuvo fuertemente condicionada por las tasas de ventilación en el interior del edificio (Figura 56), las cuales son controladas en función de la temperatura interior.



**Figura 56.** Evolución de los valores medios diezminutales de la concentración  $CO_2$  ( $C_{CO_2}$ ) medida (+) y modelizada (-) para la temperatura de consigna de 26°C, de la concentración de  $CO_2$  ( $C_{CO_2-ZA}$ ) medida (+) y modelizada (-) para la temperatura de consigna de 25°C y de la  $V_{EX}$  para la temperatura de 26°C (··) y 25°C (··).

Las estadísticas que se resumen en la Tabla 48 muestran la bondad de ajuste del patrón senoidal a los datos de la variación diaria de la concentración de  $CO_2$  en alojamientos de destete para distintas temperaturas de consigna.

**Tabla 48.** Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error medio (AE), desviación estándar del error (SDE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error medio relativo (RME) para el ajuste de la evolución diaria de la concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) a una curva senoidal para cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).

$T_C$ (°C)	$R^2$	AE (ppm)	SDE (ppm)	RMSE (ppm)	RME (%)
26	0,73	-9,54E-13	293,75	297,75	-0,46
25	0,11	9,12E-13	187,80	187,80	0,07

Los estadísticos obtenidos muestran que, aunque para temperaturas de consigna de 25°C el ajuste senoidal muestra valores del error medio, desviación estándar del error, raíz del error cuadrático medio y error medio relativo aceptables, el coeficiente de determinación es muy bajo, por lo que el ajuste senoidal es muy deficiente. Por tanto, los estadísticos obtenidos para el ajuste senoidal de la evolución diaria de la  $C_{CO_2-ZA}$  muestran resultados contradictorios para las dos temperaturas de consigna estudiadas, ya que, mientras los resultados obtenidos para la temperatura de 26°C son aceptables, no ocurre lo mismo para la temperatura de 25°C. Esto sugiere que la  $C_{CO_2-ZA}$  está fuertemente condicionada, no solo por las tasas de ventilación en el interior del edificio, controladas en base a la temperatura en el interior del local, sino también por el crecimiento de los animales y su actividad. Estos resultados difieren de los presentados por otros autores que caracterizaron la  $C_{CO_2-ZA}$  mediante expresiones senoidales tanto para conejos (Calvet *et al.*, 2010a) como para broilers (Calvet *et al.*, 2010b). En consecuencia, la onda senoidal para la  $C_{CO_2}$  en explotaciones porcinas de producción de lechones de 20 kg de p.v. no proporciona un patrón fiable para la estimación en tiempo real de la concentración de  $CO_2$ , por lo que no debe ser incluida como un parámetro en las estrategias de control.

### 5.3.3 evolución diaria de la concentración de humedad relativa en la zona animal

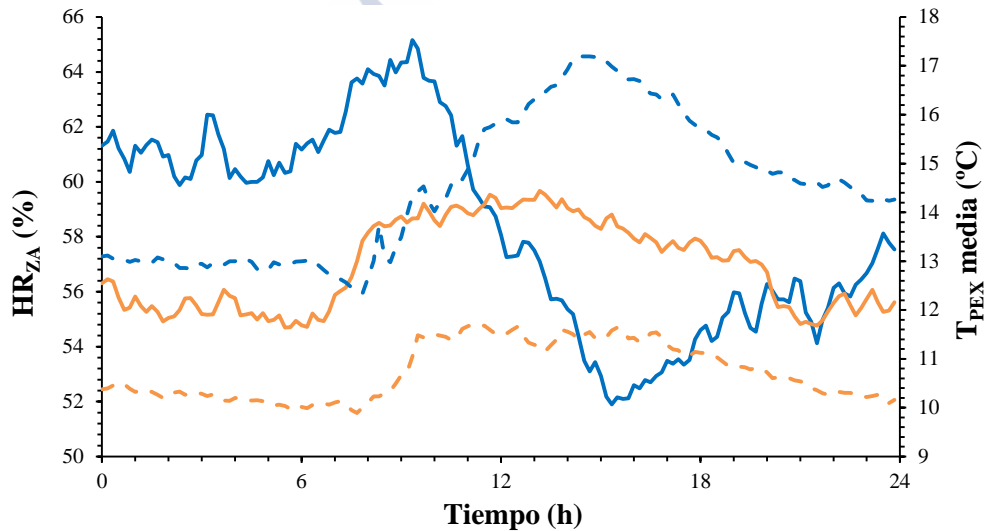
La  $HR_{ZA}$  disminuyó con la temperatura de consigna, con valores medios de 58,40 y 56,95% para las temperaturas de consigna 26°C y 25°C respectivamente, tal y como se muestra en la Tabla 49. Para ambas temperaturas los valores de  $HR_{ZA}$  presentan poca dispersión, sobre todo para la temperatura de consigna de 25°C con una desviación estándar del 3,02%.

**Tabla 49. Valor medio (Med.), máximo (Máx.), mínimo (Mín.) y desviación estándar (SD) para la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) para cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).**

$T_C$ (°C)	Med. (%)	Máx. (%)	Mín. (%)	SD (%)
26	58,40	65,16	51,90	7,34
25	56,95	59,70	54,70	3,02

La Figura 57 muestra la evolución de concentración de  $HR_{ZA}$  y la  $T_{PEX}$  para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C. Para la temperatura de consigna de 26°C, la  $HR_{ZA}$  es más alta durante la noche, cuando se producen las temperaturas más bajas en el pasillo exterior, alcanzando el valor máximo entorno a las 9:00 h, mientras que durante el día se produce el efecto contrario.

Para la temperatura de consigna de 25°C, se observó una tendencia diferente. Los mayores valores de  $HR_{ZA}$  se registraron durante el día, cuando las temperaturas del aire en el pasillo exterior eran más altas. La  $HR_{ZA}$  alcanzó el valor mínimo por la noche. Por tanto, se observa como los valores medios diez-minutales para 25°C de  $HR_{ZA}$  y  $T_{PEX}$  siguen una evolución paralela.



**Figura 57.** Evolución de los valores medios diezminutales de humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) (—) y temperatura en el pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 26°C, y de la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) (—) y la temperatura en pasillo exterior ( $T_{PEX}$ ) (- -) para una temperatura de consigna de 25°C.

Para adaptar la evolución diaria de la HR a una función senoidal, se determinaron, la amplitud (A) y el ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) de la onda senoidal. La Tabla 50 resume los valores obtenidos para cada temperatura de consigna (Figura 58).

**Tabla 50.** Valores característicos de la curva senoidal de la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) para cada temperatura de consigna: amplitud (A) ángulo de fase inicial ( $\phi$ ) y hora de inicio de la onda (Inicio) para cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).

$T_C$ (°C)	A (%)	$\Phi$ (rad)	Inicio (h)
26 °C	6,63	3,50E-03	00:01
25 °C	2,49	-1,90	07:14

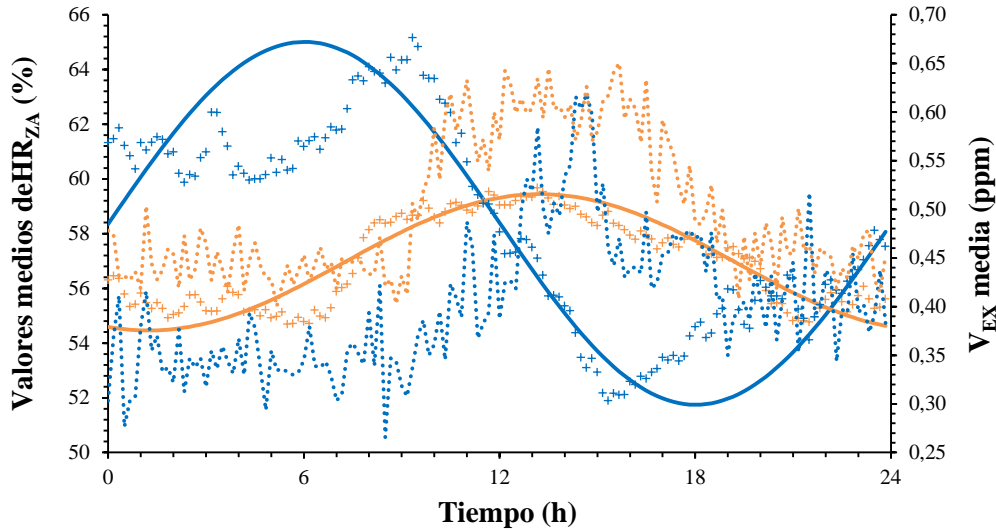
La amplitud de la función senoidal experimenta una disminución importante en función de la temperatura de consigna, pasando del 6,63% al 2,49 % para 26 y 25°C respectivamente.

El ángulo de fase inicial fue negativo y muy distante para las dos temperaturas de consigna. La  $HR_{ZA}$  inicial se encontró por debajo de su valor medio en un 1.36% y un 1.14%, respectivamente.

La evolución de la  $HR_{ZA}$  (Figura 58) para la temperatura de consigna de 26°C aproxima a un patrón senoidal, alcanzándose los valores máximos y mínimos durante el día, a las 09:00 h y a las 15:00 h, respectivamente. Para la temperatura de consigna de 25°C, se sigue más claramente un patrón senoidal, pero se produce un retraso en la onda (de 7 horas y 13 minutos). Se puede observar como los valores de concentración son más altos durante las horas centrales del día, alcanzando el máximo a las 13:00 h y los valores más bajos se producen por la noche. El incremento de la tasa de ventilación al crecer los lechones da lugar a una extracción efectiva de la humedad del alojamiento, que la reduce, a pesar del aumento de la humedad exterior.



Calvet *et al.* 2011a observaron un patrón senoidal en la evolución de la concentración de humedad relativa en granjas de cebo de conejos. Este patrón coincide con el observado para la temperatura de consigna de 26°C, mostrando concentraciones mayores durante la noche, alcanzando el valor máximo a las 05:00 h y con concentraciones más bajas durante el día, con valores mínimos entorno a las 14:00 h.



**Figura 58.** Evolución de los valores medios diezminutales de la humedad relativa ( $HR_{ZA}$ ) medidos (+) y modelizados (-) para la temperatura de consigna de 26°C, de la humedad relativa ( $HR_{ZA}$ ) medidos (+) y modelizados (-) para la temperatura de consigna de 25°C y de la  $V_{EX}$  para la temperatura de 26°C (••) y 25°C (••).

Las estadísticas que se resumen en la Tabla 51 muestran la bondad de ajuste del patrón senoidal a los datos de la variación diaria de  $HR_{ZA}$  en alojamientos de postdestete basados en la temperatura de consigna.

**Tabla 51.** Coeficiente de determinación ( $R^2$ ), error medio (AE), desviación estándar del error (SDE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error medio relativo (RME) para el ajuste de la evolución diaria de la concentración de humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) a una curva senoidal para cada temperatura de consigna ( $T_C$ ).

$T_C$ (°C)	$R^2$	AE (%)	SDE (%)	RMSE (%)	RME (%)
26	0,81	-2E-14	2,14	2,14	-0,06
25	0,83	-1,50E-14	0,73	0,73	-6E-04

El coeficiente de determinación,  $R^2$ , fue de 0,81 y 0,83 para los puntos de ajuste de temperatura de 26 y 25°C respectivamente. El valor de  $R^2$  aumenta con el descenso de la temperatura de consigna, disminuye el error, lo que proporciona un mejor ajuste para la

temperatura de consigna de 25°C. Estos resultados fueron apoyados por otros estadísticos, entre los cuales un sesgo o error promedio proporcionó subestimaciones leves con los valores de AE prácticamente nulos.

La desviación estándar del error (SDE) varió de 2,14 a 0,73. Los errores medios relativos (RME) se encontraron entre -0,06% y -6E-04%, por lo que el RMSE se corresponde con el valor de la SDE. La onda senoidal para la  $HR_{ZA}$  en las granjas de cerdos proporciona un patrón fiable que podría implementarse para la estimación en tiempo real de la concentración de HR y ser incluida como un parámetro en las estrategias de control.





# Capítulo 6.

## Conclusiones

---





## Capítulo 6. Conclusiones

---

Como resultado del estudio de las variables relacionadas con la calidad ambiental, de carácter animal y relativas al funcionamiento de las instalaciones en una explotación de ganado porcino en Galicia, de cría de lechones de 6 a 20 kg de p.v., se pueden extraer las siguientes conclusiones, divididas en tres grupos:

Del estudio de las variables ambientales asociadas al confort de los animales y del análisis del funcionamiento de las instalaciones de climatización:

1. Los sistemas de control ambiental basados únicamente en la temperatura se adaptan mejor a los requerimientos térmicos del local en los periodos fríos.
2. Un control basado en la temperatura afecta indirectamente a las concentraciones de gases. Incrementos de las tasas de ventilación durante los periodos cálidos obtienen menores valores de concentración de CO<sub>2</sub> y HR más ajustados a las recomendaciones. Por el contrario, la limitación de la tasa de ventilación durante las estaciones frías da lugar a mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> y de HR, incluso cuando la HR exterior es menor que en los meses cálidos.
3. Generalmente temperatura, HR y concentración de CO<sub>2</sub> en el alojamiento presentan diferencias significativas tanto entre ciclos como entre los distintos períodos crítico, postcrítico y final, consecuencia del cambio en las condiciones ambientales y del crecimiento de los animales. La concentración de CO<sub>2</sub> muestra variaciones estacionales más claras que presentan carácter sinusoidal.
4. La ubicación de los sensores fuera de la zona animal obliga a establecer relaciones entre su temperatura y la de otras zonas accesibles, que en este caso ha sido a 1 m de altura. Como media se obtuvo una temperatura de 1°C mayor en la zona animal, con variaciones lineales entre ambos puntos.
5. El análisis de la variación longitudinal de temperaturas en la sala proporcionó expresiones parabólicas que permiten su cuantificación de forma simple. Esto permite optimizar la posición del sensor fuera del alcance del animal, a 1 m de altura, y en la zona de mayor similitud con la media, entre ¼ y 1/3 de la longitud del local.

6. Transversalmente, la temperatura apenas experimenta variaciones, obteniéndose los valores mínimos en el centro del pasillo de la sala, con máximas diferencias inferiores a 0,90°C.
7. A medida que se incrementa la temperatura exterior aumentan los requerimientos energéticos en ventilación y disminuyen en calefacción. Sin embargo la interacción entre ambas instalaciones hace que se invierta esta tendencia de forma puntual. Así, surgen ciclos que por su temperatura deberían tener menor demanda de calefacción y que, debido al manejo de la ventilación con tasas elevadas, requieren mayores consumos. Esto muestra la gran importancia de coordinar los sistemas de calefacción y ventilación para la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones.
8. Comparando ciclos saturados y no saturados, a temperaturas exteriores similares, el mejor manejo de la HR dio lugar a un ahorro del 17% de la energía en los sistemas de climatización durante el ciclo, que se tradujo en un ahorro entre el 33 y el 47% de la energía aplicada por kg de lechón producido. Por tanto, la inclusión de la HR como variable de control podría suponer mayores tasas de ventilación con consecuencias positivas en el bienestar animal, en la reducción del consumo energético del sistema de calefacción y en la mejora de la productividad.

De la estimación de la concentración de  $\text{NH}_3$  a partir de otras variables ambientales de más fácil medición se extrajeron las siguientes conclusiones:

1. En general, las correlaciones son más altas para la consigna de 26°C, que para la de 25°C. De ello se desprende la importante incidencia de la temperatura de consigna en la dinámica de flujos de masa y energía que se produce en el alojamiento.
2. La  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  correlaciona positivamente con la  $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$  ( $R= 0,91$  y  $0,55$ ) y la  $HR$  ( $R= 0,78$  y  $0,18$ ) para 26 y 25°C respectivamente. La  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ , al estar relacionada con el funcionamiento del sistema de ventilación, hace que presente valores de correlación son altos, positivos para  $T_{PEX}$  y negativos para  $V_{EX}$ . Sin embargo, para la AA y la  $T_{ZA}$ , las correlaciones son bajas. En general, aquellas variables que presentan un máximo y un mínimo bien definido en su evolución

diaria, tienen buena correlación con la  $C_{NH_3-ZA}$ , salvo con la  $HR$  a temperatura de consigna de 25°C.

3. Del conjunto de los gases analizados, la  $C_{CO_2-ZA}$  es la que presenta mejores correlaciones tanto con la  $C_{NH_3-ZA}$  como con la  $HR_{ZA}$ , lo que permitiría un control indirecto sobre ambas variables.
4. Para la temperatura de consigna de 26°C, dos modelos de dos variables dieron los mejores resultados: (1)  $C_{CO_2-ZA}$ ,  $T_{PEX}$  y (2)  $HR_{ZA}$ ,  $T_{PEX}$ . Sin embargo, para la temperatura de 25°C, el mejor modelo incluyó tres variables:  $V_{EX}$ ,  $T_{PEX}$ ,  $AA_M$ . Dadas estas diferencias, se recomienda el empleo de modelos lineales de regresión basados en las variables  $C_{CO_2-ZA}$  y  $T_{PEX}$ , ya que proporcionan buenos ajustes en ambas temperaturas de consigna, además de estar basados en variables de fácil medición.

Del análisis del patrón de evolución diaria de las variables  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  y  $HR_{ZA}$  se concluye:

1. Los niveles de  $C_{NH_3-ZA}$  y  $C_{CO_2-ZA}$  aumentan a medida que se reduce la temperatura de consigna de 26 a 25°C, mientras que la  $HR_{ZA}$  registra un leve descenso. Por tanto, el aumento de la tasa de ventilación inherente al descenso de temperatura de consigna tuvo mayor efecto sobre la  $HR_{ZA}$ .
2. En periodo nocturno, con temperaturas ambientales más bajas, la tasa de ventilación va a ser más reducida, lo que da lugar a incrementos de la  $C_{NH_3-ZA}$ . El aumento de la temperatura exterior durante el día, aumenta la tasa de ventilación y por tanto la extracción del gas, debido a su elevada volatilidad.
3. Esta evolución diaria de la  $C_{NH_3-ZA}$  es simétrica con respecto a la variación diaria de la temperatura exterior y sigue un patrón senoidal con valores de  $R^2$  entre 0,93 y 0,88 para 26 y 25°C respectivamente y sesgos prácticamente nulos.
4. La evolución de la  $C_{CO_2-ZA}$  muestra importantes diferencias a las distintas temperaturas de consigna. A 26°C, los valores nocturnos son claramente mayores que los diurnos, mientras que a 25°C las diferencias entre el día y la noche se reducen considerablemente.

5. Esta diferencia en la evolución diaria de la  $C_{CO_2-ZA}$  proporciona resultados contradictorios en el ajuste senoidal, que son aceptables para 26°C de temperatura de consigna, pero no para 25°C. Por tanto, la onda senoidal diaria para la  $C_{CO_2-ZA}$  no proporciona un patrón fiable para la estimación en tiempo real de la concentración de CO<sub>2</sub>.
6. Para la temperatura de consigna de 26°C, la  $HR_{ZA}$  alcanza los valores máximos durante el día con valores máximos entorno a las 06:00 h. Para la temperatura de consigna de 25°C, la  $HR_{ZA}$  es más alta durante las horas centrales del día con un valor máximo entorno a las 13:14 h.
7. La onda senoidal diaria para la  $HR_{ZA}$  proporciona un patrón fiable para las temperaturas de consigna de 26 y 25°C, con valores de R<sup>2</sup> entre 0,81 y 0,83 y un error medio prácticamente nulo.
8. El uso de ecuaciones senoidales para estimar la  $HR_{ZA}$  y la  $C_{NH_3-ZA}$  puede ser beneficioso para los ganaderos, en la medida en que proporcionan información sobre los niveles de las variables y, por tanto, sobre el nivel de contaminantes y confort térmico a los que están expuestos los animales. Debido a que la sencillez de la expresión permite su implementación en muchos controladores convencionales, las ecuaciones senoidales podrían ser valiosas para el control en tiempo real del sistema de control climático, lo que mejoraría el bienestar animal.

## Conclusions

---

As a result of the study of the variables related to environmental quality, animals and related to the operation of the facilities in a post-weaning piglet farm, from 6 to 20 kg of live weight in Galicia, the following conclusions can be extracted, divided into three groups:

From the study of the environmental variables associated with the confort of the animals and the analysis of the operation of the heating and ventilations systems.

1. Temperature control systems based on temperature are best suited to the thermal requirements of the room in cold periods.
2. A temperature-based control indirectly affects gas concentrations. Increases in ventilation rates during hot periods result in lower values of CO<sub>2</sub> concentration and RH more adjusted to the recommendations. Conversely, limiting the rate of ventilation during cold seasons results in higher CO<sub>2</sub> and RH concentrations, even when the external RH is lower than in the warm months.
3. Generally temperature, RH and CO<sub>2</sub> concentration in the housing presents significant differences between cycles as well as between critical, postcritical and final periods, as a consequence of the change in the environmental conditions and the growth of the animals. The CO<sub>2</sub> concentration shows clearer seasonal variations that have a sinusoidal character.
4. The location of the sensors outside the animal zone makes it necessary to establish relationships between its temperature and that of other accessible areas, which in this case has been at a height of 1 m. On average, a temperature of 1°C higher in the animal zone was obtained, with linear variations between both points.
5. Analysis of the longitudinal variation of temperatures in the room provided parabolic expressions that allow its quantification in a simple way. This makes it possible to optimize the position of the sensor outside the reach of the animal, at 1 m in height, and in the zone of greatest similarity with the average, between  $\frac{1}{4}$  and  $\frac{1}{3}$  of the length of the room.

6. Transversally, the temperature hardly undergoes variations, obtaining the minimum values in the center of the corridor, with maximum differences inferiors to 0,90°C.
7. As the outside temperature increases, the energy requirements in ventilation increase and decrease in heating. However, the interaction between both facilities reverses this trend in a timely manner. Thus, there are cycles that due to their temperature should have a lower demand for heating and, due to the handling of ventilation with high rates, require higher consumption. This shows the great importance of coordinating heating and ventilation systems to improve the energy efficiency of the facilities.
8. Comparing saturated and unsaturated cycles, at similar outdoor temperatures, the best management of the RH resulted in a 17% saving of the energy requeriments of ventilation/heating systems during the cycle, which resulted in savings between 33 and 47% of the energy applied per kg of piglet produced. Therefore, the inclusion of RH as a control variable could lead to higher ventilation rates with positive consequences on the animal welfare, reduction of energy consumption of the heating system and improvement of productivity.

From the estimation of the  $\text{NH}_3$  concentration from other environmental variables easier measurement the following conclusions were extracted:

1. In general, the correlations are higher for the setpoint of 26 ° C than for the setpoint of 25 ° C. As a consequence, the important incidence of the setpoint temperature in the dynamics of mass and energy flows occurring in the housing is evident.
2.  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$  correlated positively with  $C_{\text{CO}_2\text{-ZA}}$  ( $R = 0,91$  and  $0,55$ ) and RH ( $R = 0,78$  and  $0,18$ ) for 26 and 25°C respectively.  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ , as it is related to the operation of the ventilation system, causes that correlation values are high, positive for  $T_{\text{PEX}}$  and negative for  $V_{\text{EX}}$ . However, for AA and  $T_{\text{ZA}}$ , the correlations are low. In general, those variables with a well defined maximum and minimum in their daily evolution have a good correlation with the  $C_{\text{NH}_3\text{-ZA}}$ , except with the RH at setpoint temperature of 25°C.

3. From the set of analyzed gases, the  $C_{CO_2-ZA}$  is the one with the best correlations with both  $C_{NH_3-ZA}$  and  $HR_{ZA}$ , which would allow an indirect control over both variables.
4. Related to the setpoint temperature of 26°C, two models of two variables gave the best results: (1)  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $T_{PEX}$  and (2)  $HR_{ZA}$ ,  $T_{PEX}$ . However, for the temperature of 25°C, the best model included three variables:  $V_{EX}$ ,  $T_{PEX}$ ,  $AA_M$ . Given these differences, the use of linear regression models based on the variables  $C_{CO_2-ZA}$  and  $T_{PEX}$  is recommended, since they provide good adjustments in both setpoint temperatures, besides being based on variables of easy measurement.

From the analysis of the daily evolution pattern of the variables  $C_{NH_3-ZA}$ ,  $C_{CO_2-ZA}$  and  $HR_{ZA}$ , we conclude:

1. The levels of  $C_{NH_3-ZA}$  and  $C_{CO_2-ZA}$  increase as the setpoint temperature decreases from 26° to 25°C, while the  $HR_{ZA}$  decreases slightly. Therefore, the increase in ventilation rate inherent to the drop in setpoint temperature had a greater effect on  $HR_{ZA}$ .
2. During the night time, with lower ambient temperatures, the ventilation rate will be reduced, which results in increases of the  $C_{NH_3-ZA}$ . The increase of the external temperature during the day increases the rate of ventilation and therefore the extraction of the gas, due to its high volatility.
3. This daily evolution of the  $C_{NH_3-ZA}$  is symmetrical with respect to the daily variation of the outside temperature and follows a sinusoidal pattern with values of  $R^2$  between 0,93 and 0,88 for 26 and 25°C respectively and almost zero bias.
4. The evolution of the  $C_{CO_2-ZA}$  shows important differences at different setpoint temperatures. At 26°C, the nocturnal values are clearly higher than those of diurnal ones, whereas at 25°C the differences between day and night are considerably reduced.

5. This difference in the daily evolution of the  $C_{CO_2-ZA}$  provides contradictory results in the sinusoidal adjustment, which are acceptable for 26°C setpoint temperature, but not for 25°C. Therefore, the daily sine wave for  $C_{CO_2-ZA}$  does not provide a reliable pattern for real-time estimation of CO<sub>2</sub> concentration.
6. For the setpoint temperature of 26°C, the  $HR_{ZA}$  reaches maximum values during the day with maximum values around 06:00 h. For the setpoint temperature of 25°C, the  $HR_{ZA}$  is highest during the central hours of the day with a maximum value around 13:14 h.
7. The daily sine wave for the  $HR_{ZA}$  provides a reliable pattern for setpoint temperatures of 26 and 25°C, with  $R^2$  values between 0,81 and 0,83 and a almost zero mean error.
8. The use of sinusoidal equations to estimate  $HR_{ZA}$  and  $C_{NH_3-ZA}$  may be beneficial for livestock farmers, to the extent that they provide information on the levels of the variables and, therefore, on the level of contaminants and thermal comfort at which animals are exposed. Because simplicity of expression allows its implementation in many conventional controllers, sinusoidal equations could be valuable for real-time control of the climate control system, which would improve animal welfare.

# **Capítulo 8.**

## **Referencias bibliográficas**

---





## Capítulo 7. Referencias bibliográficas

---

- Aarnink, A. J. A., Van Ouwerkerk, E. N. J., & Verstegen, M. W. A. (1992). A mathematical model for estimating the amount and composition of slurry from fattening pigs. *Livestock Production Science*, 31(1), 133-147.
- Aarnink, A. J. A., Koetsier, A. C., & van den Berg, A. J. (1993). Dunging and lying behaviour of fattening pigs in relation to pen design and ammonia emission. *Livestock Environment IV*, 1176-1184.
- Aarnink, A. J. A., Keen, A., Metz, J. H. M., Speelman, L., & Verstegen, M. W. A. (1995). Ammonia emission patterns during the growing periods of pigs housed on partially slatted floors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(2), 105-116.
- Aarnink, A. J. A., Van Den Berg, A. J., Keen, A., Hoeksma, P., & Verstegen, M. W. A. (1996). Effect of slatted floor area on ammonia emission and on the excretory and lying behaviour of growing pigs. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 64(4), 299-310.
- Aarnink, A. J. A., Swierstra, D., Van den Berg, A. J., & Speelman, L. (1997). Effect of type of slatted floor and degree of fouling of solid floor on ammonia emission rates from fattening piggeries. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66(2), 93-102.
- Aerts, J. M., Wathes, C. M., & Berckmans, D. (2003). Dynamic data-based modelling of heat production and growth of broiler chickens: development of an integrated management system. *Biosystems Engineering*, 84(3), 257-266.
- Anderson, G. A., Smith, R. J., Bundy, D. S., & Hammond, E. G. (1987). Model to predict gaseous contaminants in swine confinement buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 37(3), 235-253.
- Andersson, M. (1996). Performance of bedding materials in affecting ammonia emissions from pig manure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 65(3), 213-222.
- Arango, T., Ortega, J., Fernández, M.D., Osorio, L. (2014). Caracterización de la actividad animal en alojamientos porcinos de la fase de destete. In "VII Congreso

- Ibérico de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas: Innovar y producir para el Futuro” (F.G.UPM,ed.), pp.:317-321. ISBN: 10:84-695-9055-3, Madrid.
- ASAE. 1990. Design of ventilation systems for poultry and livestock shelters. In ASAE Standards 1990, 411-428. St. Joseph: MI: ASAE.
- Banhazi, T. M., Stott, P., Rutley, D., Blanes-Vidal, V., & Pitchford, W. (2011). Air exchanges and indoor carbon dioxide concentration in Australian pig buildings: Effect of housing and management factors. *Biosystems engineering*, 110(3), 272-279.
- Banhazi, T. y C. Cargill. 1998. An assessment of the benefits of age-segregated rearing and all-in/all-out management in respiratory disease free herds. Proceedings of the 15th IPVS congress 2: 387.
- Banhazi, T., Dunn, M., Cook, P., Black, J., Durack, M., & Johnson, I. (2007). Development of precision livestock farming (PLF) technologies for the Australian pig industry. In 3rd European Precision Livestock farming Conference (Vol. 1, pp. 219-228).
- Banhazi, T. M., J. Seedorf, M. Laffrique y D. L. Rutley. 2008a. Identification of the risk factors for high airborne particle concentrations in broiler buildings using statistical modelling. *Biosystems engineering* 101 (1): 100-110.
- Banhazi, T. M., J. Seedorf, D. L. Rutley y W. S. Pitchford. 2008b. Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 1. study justification and design. *Journal of agricultural safety and health* 14 (1): 5-20.
- Banhazi, T. M., J. Seedorf, D. L. Rutley y W. S. Pitchford. 2008c. Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 2. airborne pollutants. *Journal of agricultural safety and health* 14 (1): 21-39.
- Banhazi, T. M., Rutley, D. L., & Pitchford, W. S. 2008d. Identification of risk factors for sub-optimal housing conditions in Australian piggeries: Part 4. Emission factors and study recommendations. *Journal of Agricultural Safety and Health*, 14(1), 53-69.
- Barrasa, M., S. Lamosa, M. D. Fernández y E. Fernández. 2012. Occupational exposure to carbon dioxide, ammonia and hydrogen sulphide on livestock farms in northwest Spain. *Annals of agricultural and environmental medicine* 19 (1).

- Bastian, R. K. (1992). Overview of federal regulations pertaining to aquaculture waste management and effluents. National Livestock, Poultry, and Aquaculture Waste Management. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 220-226.
- Becaccia, A., Ferrer, P., Ibáñez, M. A., Estellés, F., Rodríguez, C., Moset, V., de Blas, C., Calvet, S, & García-Rebollar, P. (2015). Relationships among slurry characteristics and gaseous emissions at different types of commercial Spanish pig farms. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 13(1), 0602.
- Berckmans, D., & Goedseels, V. (1986). Development of new control techniques for the ventilation and heating of livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 33(1), 1-12.
- Besteiro, R., Arango, T., Rodríguez, M. R., Fernández, M. D., & Velo, R. (2017). Estimation of patterns in weaned piglets' activity using spectral analysis. *Biosystems Engineering*.
- Blanes, V. y S. Pedersen. 2005. Ventilation flow in pig houses measured and calculated by carbon dioxide, moisture and heat balance equations. *Biosystems engineering* 92 (4):483-493.
- Blanes-Vidal, V., Hansen, M. N., Pedersen, S., & Rom, H. B. (2008). Emissions of ammonia, methane and nitrous oxide from pig houses and slurry: Effects of rooting material, animal activity and ventilation flow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 124(3), 237-244.
- Bluteau, C. V., Massé, D. I., & Leduc, R. (2009). Ammonia emission rates from dairy livestock buildings in eastern Canada. *Biosystems engineering*, 103(4), 480-488.
- Bottcher, R., Mathis, S., Roberts, J., 2001. Monitoring air quality with instruments. *Proceedings of the North Carolina Healthy Hogs Seminar*. North Carolina Cooperative Extension Service. 10 pp.
- Brouwer, E. (1965). Report of sub-committee on constants and factors. *Energy metabolism*, 1965, 441-443.
- Buijsman, E., & Erisman, J. W. (1988). Wet deposition of ammonium in Europe. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 6(3), 265-280.
- Busse, F. W. (1993). Comparison measurements of the house climate in swine stables with and without respiratory diseases or cannibalism. In *Livestock Environment*.

- Fourth International Symposium (pp. 904-908). ASAE St. Joseph, Michigan, and University of Warwick, Coventry, England.
- Bruce, J.M., 1981. Ventilation and temperature control criteria for pigs. In: Clark, J.A. (Ed.) *Environmental Aspects of Housing for Animal Production*. Butterworths, London. pp. 197-216.
- Calvet, S., Cambra-López, M., Blanes-Vidal, V., Estellés, F., & Torres, A. G. (2010). Ventilation rates in mechanically-ventilated commercial poultry buildings in Southern Europe: Measurement system development and uncertainty analysis. *Biosystems Engineering*, 106(4), 423-432.
- Calvet, S., Cambra-López, M., Barber, F. E., & Torres, A. G. (2011a). Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms. *World Rabbit Science*, 19(1), 49-61.
- Calvet, S., Estellés, F., Cambra-López, M., Torres, A. G., & Van den Weghe, H. F. A. (2011b). The influence of broiler activity, growth rate, and litter on carbon dioxide balances for the determination of ventilation flow rates in broiler production. *Poultry Science*, 90(11), 2449-2458.
- Calvet, S., Hunt, J., & Misselbrook, T. H. (2017). Low frequency aeration of pig slurry affects slurry characteristics and emissions of greenhouse gases and ammonia. *Biosystems Engineering*, 159, 121-132.
- Cargill, C., & Skirrow, S. (1997). Air quality in pig housing facilities. In *Proceedings-University of Sydney Post Graduate Foundation in Veterinary Science*, 285, 85-104.
- Cargill, C., Banhazi, T., & Connaughton, I. (1998). The influence of air quality on production increases associated with all-in/all-out management. In *Proceedings of the 15th IPVS Congress*, University of Birmingham, Birmingham, England (p. 248).
- Cargill, C., Murphy, T., & Banhazi, T. (2002). Hygiene and air quality in intensive housing facilities in Australia. In D. K. Revell, & D. Taplin (Eds.), *Animal Production in Australia* (pp. 387-393). Adelaide, South Australia: Australian Society of Animal Production.
- Chao, K., Gates, R. S., & Sigrimis, N. (2000). Fuzzy logic controller design for staged heating and ventilating systems. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1885.

- Choi, H.L., Kim, K.Y., Kim, H., 2005. Correlation of air pollutants and thermal environment factors in a confined pig house in winter. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 18(4): pp 574-579.
- Chou, Y.M., Polansky, A.M., & Mason, R.L (1998). Transforming non-normal data to normality in statistical process control. *Journal of Quality Technology*, 30(2), 133.
- Chwalibog, A., Tauson, A. H., & Thorbek, G. (2004). Diurnal rhythm in heat production and oxidation of carbohydrate and fat in pigs during feeding, starvation and refeeding. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 88(7-8), 266-274.
- CIGR (1992). *Climatization of animal houses*. Commission Internationale du Génie Rural, Faculty of Agricultural Sciences, State University of Gent, Gent, Belgium.
- CIGR (1999). *CIGR handbook of agricultural engineering: Animal production and aquacultural engineering*, editado por ASAE. Vol. 2. Universidad de Wisconsin – Madison.
- CIGR (2002). 4<sup>th</sup> Report of working group climatization of animal houses: Heat and moisture production. CIGR – The international Commission of Agricultural Engineering, Section II.
- Close, W. H., & Stanier, M. W. (1984). Effects of plane of nutrition and environmental temperature on the growth and development of the early-weaned piglet 2. Energy metabolism. *Animal Production*, 38, 221-231.
- Coffey, R. D., & Cromwell, G. L. (1994). Spray-dried porcine plasma in diets for early-weaned pigs housed either in an experimental or conventional nursery setting. *Journal of Animal Science*, 72(69 Suppl 2).
- Collin, A., Van Milgen, J., Dubois, S., & Noblet, J. (2001). Effect of high temperature and feeding level on energy utilization in piglets. *Journal of animal science*, 79(7), 1849-1857.
- Cortus, E. L., Lemay, S. P., Barber, E. M., Hill, G. A., & Godbout, S. (2008). A dynamic model of ammonia emission from urine puddles. *Biosystems Engineering*, 99(3), 390-402.
- Costa, A., & Guarino, M. (2009). Definition of yearly emission factor of dust and greenhouse gases through continuous measurements in swine husbandry. *Atmospheric Environment*, 43(8), 1548-1556.

- Curtis, S. E., Drummond, J. G., & Simon, J. (1977). Atmospheric ammonia affects swine health [Air pollution injuries]. *Illinois Research*, 19(4): 8-9.
- Daskalov, P. I. 1997. Prediction of temperature and humidity in a naturally ventilated pig building. *Journal of agricultural engineering research* 68 (4): 329-339.
- Daskalov, P. I., K. G. Arvanitis, G. D. Pasgianos y N. A. Sigrimis. 2006. Non-linear adaptive temperature and humidity control in animal buildings. *Biosystems engineering* 93 (1): 1-24.
- Demmers, T. G. M., Burgess, L. R., Short, J. L., Phillips, V. R., Clark, J. A., & Wathes, C. M. (1999). Ammonia emissions from two mechanically ventilated UK livestock buildings. *Atmospheric environment*, 33(2), 217-227.
- Dong, G. Z., & Pluske, J. R. (2007). The low feed intake in newly-weaned pigs: problems and possible solutions. *Asian-australasian journal of animal sciences*, 20(3), 440-452.
- Donham, K. J., Knapp, L. W., Monson, R., & Gustafson, K. (1982). Acute toxic exposure to gases from liquid manure. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 24(2), 142-145.
- Donham, K. J., Scallon, L. J., Popendorf, W., Treuhaft, M. W., Roberts, R. C., 1986. Characterization of dusts collected from swine confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 47(7), 404-410.
- Donham, K. J. (1991). Association of environmental air contaminants with disease and productivity in swine. *American Journal of Veterinary Research*, 52(10), 1723-1730.
- Donham, K. J. (2000). The concentration of swine production: Effects on swine health, productivity, human health, and the environment. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 16(3), 559-597.
- Donham, K., Thorne, P., Breuer, G., Powers, W., Marquez, S., Reynolds, S., 2002. Exposure limits related to air quality and risk assessment. *Iowa concentrated Animal Feeding Operations Air Quality Study*, p 164.
- Drummond, J. G., Curtis, S. E., Simon, J., & Norton, H. W. (1980). Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. *Journal of Animal Science*, 50(6), 1085-1091.

- Duchaine, C., Grimard, Y., & Cormier, Y. (2000). Influence of building maintenance, environmental factors, and seasons on airborne contaminants of swine confinement buildings. *AIHAJ-American Industrial Hygiene Association*, 61(1), 56-63.
- Echevarría, A. I., Parsi, J., Trolliet, J., Bocco, O., Grivel, C., & Rossi, D. (2009). Comparison of two housing types for weaner pigs: confinement and outdoor. *REDVET*, 10(10).
- Eguinoa, P., Zuazu, M. R., & Sardina, F. A. M. (2005). Control ambiental en alojamientos ganaderos de Navarra. *Navarra agraria*, (148), 57-63.
- Feddes, J. J. R., & DeShazer, J. A. (1991). Feed consumption as a parameter for establishing minimum ventilation rates. *Transactions of the ASAE*, 31(2), 571-0575.
- Feenstra, A. (1984). Environmental experiments with weaned piglets. In *Air temperature* (p. 62). Danish Building Research Institute. SBI Landbrugsbyggeri.
- Forcada, F. (1997). *Alojamientos para Ganado Porcino*. Mira Editores. Zaragoza. 303 pp.
- Forcada, F., D. Babot, A. Vidal y C. Buxadé. 2009. *Ganado porcino: Diseño de alojamientos e instalaciones*, editado por Servet Zaragoza.
- Forcada, F., Guillén, R., Babot, D., & Álvarez-Rodríguez, J. (2014). Condiciones ambientales en el interior de un cebadero porcino en el Valle del Ebro. Influencia de la orientación frente a los vientos dominantes. *ITEA*, 110(3), 236-250.
- Fuentes Yagüe, J. L. (1992). *Construcciones para la agricultura y la ganadería*. Ed. Mundi-Prensa. 6ª edición. Madrid. 414 pp.
- Garcimartin, M. A., Ovejero, I., Sanchez, E., & Sanchez-Giron, V. (2007). Application of the sensible heat balance to determine the temperature tolerance of commercial poultry housing. *World's Poultry Science Journal*, 63(04), 575-584.
- Gates, R. S., K. Chao y N. Sigrimis. 2001. Identifying design parameters for fuzzy control of staged ventilation control systems. *Computers and electronics in agriculture* 31(1): 61-74.
- Gates, R. S., Casey, K. D., Xin, H., Wheeler, E. F. & Simmons, J. D. (2004). Fan assessment numeration system (FANS) design and calibration specifications. *Trans. ASAE*, 47:1709–1715.

- Gonyou, H. W. (2001). The social behaviour of pigs. *Social behaviour in farm animals*, 147-176.
- Guarino, M., Fabbri, C., Navarotto, P., Valli, L., Mascatelli, G., Rossetti, M., Mazzotta, V., 2003. Ammonia, methane and nitrous oxide emissions and particulate matter concentrations in two different buildings for fattening pigs. In: *Commission Internationale du Génie Rural (Ed.), Proceedings of the International Symposium on gaseous and odour emissions from animal production facilities*. Horsens, Denmark, 1-4 June 2003, 140-149.
- Guo, H., Lemay, S. P., Barber, E. M., Crowe, T. G., & Chénard, L. (2001). Humidity control for swine buildings in cold climate- Part II: Development and evaluation of a humidity controller. *Canadian Biosystems Engineering*, 43, 5.
- Haeussermann, A., E. Hartung y T. Junbluth. 2003. Emission reduction from pig facilities by innovative ventilation control. *Swine housings II proceedings*: 134.
- Hafner, S. D., Montes, F., & Rotz, C. A. (2013). The role of carbon dioxide in emission of ammonia from manure. *Atmospheric environment*, 66, 63-71.
- Hamon, L., Andrès, Y., & Dumont, E. (2012). Aerial pollutants in swine buildings: A review of their characterization and methods to reduce them. *Environmental science & technology*, 46(22), 12287-12301.
- Hashimoto A G; Ludington D C (1971). Ammonia desorption from concentrated chicken manure slurries. *Proceedings: Livestock Waste Management and Pollution Abatement*, pp 117-121. ASAE, St Joseph, USA
- Hernández, F., Martínez, S., López, C., Megías, M. D., López, M., & Madrid, J. (2011). Effect of dietary crude protein levels in a commercial range, on the nitrogen balance, ammonia emission and pollutant characteristics of slurry in fattening pigs. *Animal: an international journal of animal bioscience*, 5(8), 1290.
- Hinz, T. y S. Linke. 1998. A comprehensive experimental study of aerial pollutants in and emissions from livestock buildings. Part 1. methods. *Journal of agricultural engineering research* 70 (1): 111-118.
- Hobbs, P. J., Misselbrook, T. H., & Cumby, T. R. (1999). Production and emission of odours and gases from ageing pig waste. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(3), 291-298.

- Hoff, S. J. (1995). Isothermal airflow characteristics in the animal-occupied zone of a slot-ventilated swine facility. *Transactions of the ASAE*, 38(6), 1843-1852.
- Hoy, S. 1995. Studies on the use of multi-gas monitoring in animal houses. *Tierärztliche Umschau* 50(2): 115-123.
- Huynh, T. T. T., A. A. Aarnink, W. J. J. Gerrits, M. J. H. Heetkamp, T. T. Canh, H. A. M. Spoolder, B. Kemp y M. W. A. Verstegen. 2005. Thermal behavior of growing pigs in response to high temperature and humidity. *Applied animal behavior science* 91 (1): 1-16.
- Instituto de Estudios Cajamar. Diciembre 2004. Situación del sector porcino en España. Informes y monografías. <http://www.publicacionescajamar.es/>
- Ivanova-Peneva, S. G., Aarnink, A. J. A., Verstegen, M. W. A., 2008. Ammonia emissions from organic housing systems with fattening pigs. *Biosystems Engineering*, 99(3), 412-422.
- Jacobson, L. D., Janni, K. A., Arellano, P. E., & Pijoan, C. J. (1992). Winter swine ventilation evaluation using air quality criteria. Paper-American Society of Agricultural Engineers (USA).
- Jacobson, L. D., Heber, A. J., Hoff, S. J., Zhang, Y., Beasley, D. B., Koziel, J. A., & Hetchler, B. P. (2006, June). Aerial pollutants emissions from confined animal buildings. In *Proceedings workshop on agricultural air quality: state of science*. Bolger conference center, Potomac, Maryland.
- Jeppsson, K. H. (2000). Aerial environment in uninsulated livestock buildings (No. 245). *Sveriges Lantbruksuniversitet (Swedish University of Agricultural Sciences)*.
- Jeppsson, K. H. (2002). Diurnal variation in ammonia, carbon dioxide and water vapour emission from an uninsulated, deep litter building for growing/finishing pigs. *Biosystems Engineering*, 81, 213-224.
- Jones, J. B., L. R. Burgess, A. J. F. Webster y C. M. Wathes. 1996. Behavioural responses of pigs to atmospheric ammonia in a chronic choice test. *Animal science* 63: 437-445.
- Kaasik, A., & Maasikmets, M. (2013). Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia. *Biosystems engineering*, 114(3), 223-231.
- Kamada, T. y I. Notsuki. 1987. Effects of environmental temperature, humidity and air

- movement on heat loss particularly that of latent heat from the pig. *Jpn. J. zootech. sci* 58:147-154.
- Kavoelis , B. , 2003. Influence Ventilation rate on ammonia concentration and emission in animal house. *Polish Journal of Environmental Studies* 12(6): pp 709-712. Cited By in Scopus (20).
- Keeling, J. L. & Gonyou, H.W. (2001). *Social behavior in farm animals*. CABI. New York.
- Kim, K. Y., Ko, H. J., Kim, H. T., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Kim, C. N., 2007. Monitoring of aerial pollutants emitted from swine houses in Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 133, 255-266.
- Kim, K.Y., Ko, H.J., Kim, H.T., Kim, C.N., Byeon, S.H., 2008. Association between pig activity and environmental factors in pig confinement buildings. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 680–686.
- Koerkamp, P. W. G., Metz, J. H. M., Uenk, G. H., Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., Wite, R. P. P., Hartung, J., Seedorf, J. Schoröder, M. Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J. O. & Wathes, C. M. (1998). Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 79-95.
- Lambert, M., S. P. Lemay, E. M. Barber, T. G. Crowe y L. Chénard. 2001. Humidity control for swine buildings in cold climate - part I: Modelling of three control strategies. *Canadian biosystems engineering* 43: 5.
- Le Dividich, J. (1981). Effects of environmental temperature on the growth rates of early-weaned piglets. *Livestock Production Science*, 8(1), 75-86.
- Le Dividich, J., & Herpin, P. (1994). Effects of climatic conditions on the performance, metabolism and health status of weaned piglets: a review. *Livestock Production Science*, 38(2), 79-90.
- Lee, C., Giles, L. R., Bryden, W. L., Downing, J. L., Owens, P. C., Kirby, A. C., & Wynn, P. C. (2005). Performance and endocrine responses of group housed weaner pigs exposed to the air quality of a commercial environment. *Livestock Production Science*, 93(3), 255-262.

- Lemay, S. P., Welford, E. L., Zyla, L., Gonyou, H. W., Chenard, L., Godbout, S., & Barber, E. (2002). Pig urination behaviour related to ammonia emissions. CSAE-SCGR Paper, (02-507).
- Liang, Y., Xin, H., Tanaka, A., Lee, S. H., Li, H., Wheeler, E. F., ... & Casey, K. D. (2003, October). Ammonia emissions from US poultry houses: Part II—layer houses. In Proceedings of Third International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations. Raleigh, NC (pp. 147-158).
- Liu, Z., Wang, L., Beasley, D. B., & Oviedo, E. O. (2007). Modeling ammonia emissions from broiler litter with a dynamic flow-through chamber system. In 2007 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Matin, Q., De Paz, Y., & Cabero, M. (2008). Tratamiento estadístico de datos con SPSS: prácticas resueltas y comentadas. Madrid: Thomson.
- McCracken, K. J., & Caldwell, B. J. (1980). Studies on diurnal variations of heat production and the effective lower critical temperature of early-weaned pigs under commercial conditions of feeding and management. *British Journal of Nutrition*, 43(02), 321-328.
- Massabie, P., Granier, R., Guingand, N., 1999. Influence of ventilation system and air flow rate on ammonia levels in pig fattening units. *Journées de la Recherche Porcine* 31, 139–144.
- Ministerio de Agricultura, Pesca, alimentación y Medio Ambiente, subdirección general de productos ganaderos. Mayo 2017. El sector de la carne de cerdo en cifras. Principales indicadores económicos en 2016 España. <http://www.mapama.gob.es>
- Mosquera, J., Van Dooren, H. J., Aarnink, A., & Ogink, N. W. M. (2010). Development of a fast measurement method for the determination of ammonia emission reduction from floor related measures.
- Mosquera, J., & Ogink, N. W. M. (2011). Reducing the sampling periods required in protocols for establishing ammonia emissions from pig fattening buildings using measurements and modelling. *Biosystems engineering*, 110(2), 90-96.
- Muirhead, M. R., & Alexander, T. J. (1997). Managing pig health and the treatment of disease: a reference for the farm (No. Ed. 1). 5M Enterprises Ltd., PO Box 233.

- Nasirahmadi, A., Richter, U., Hensel, O., Edwards, S., & Sturm, B. (2015). Using machine vision for investigation of changes in pig group lying patterns. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 184-190.
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros* (No. 519.5 N325). McGraw Hill Interamericana.
- Ngwabie, N. M., Jeppsson, K. H., Gustafsson, G., & Nimmermark, S. (2011). Effects of animal activity and air temperature on methane and ammonia emissions from a naturally ventilated building for dairy cows. *Atmospheric Environment*, 45(37), 6760-6768.
- Ni, J. (1998). Emission of carbon dioxide and ammonia from mechanically ventilated pig house. *Dissertationes de Agricultura* (Belgium).
- Ni, J. Q., Hendriks, J., Coenegrachts, J., & Vinckier, C. (1999a). Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions. I. Exhalation by pigs. *Atmospheric Environment*, 33(22), 3691-3696.
- Ni, J. Q., Vinckier, C., Coenegrachts, J., & Hendriks, J. (1999b). Effect of manure on ammonia emission from a fattening pig house with partly slatted floor. *Livestock production science*, 59(1), 25-31.
- Ni, J. Q., Vinckier, C., Hendriks, J., & Coenegrachts, J. (1999c). Production of carbon dioxide in a fattening pig house under field conditions. II. Release from the manure. *Atmospheric Environment*, 33(22), 3697-3703.
- Ni, J. Q., Hendriks, J., Vinckier, C., & Coenegrachts, J. (2000). A new concept of carbon dioxide accelerated ammonia release from liquid manure in pig house. *Environment international*, 26(1), 97-104.
- Ni, J. Q., Heber, A. J., Darr, M. J., Lim, T. T., Diehl, C. A., & Bogan, B. W., (2009). Air quality monitoring and on-site computer system for livestock and poultry environment studies. *Trans. ASABE*, 52(3), 937-947.
- Ni, J. Q., Liu, S., Diehl, C. A., Lim, T. T., Bogan, B. W., Chen, L. & Heber, A. J. (2017). Emission factors and characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter at two high-rise layer hen houses. *Atmospheric Environment*, 154, 260-273.
- Nicks, B., B. Canart, M. Vandenheede. Temperature, air humidity and air pollution levels in farrowing or weaner pig houses. *Pig News Inf.*, 14 (1993), pp. 77N-78N.

- Nye, P. H. (1986). A model of ammonia volatilization from applied urea. I. Development of the model. *Journal of soil science*, 37(1), 9-20.
- Ogink, N. W. M., & Koerkamp, P. G. (2001). Comparison of odour emissions from animal housing systems with low ammonia emission. *Water Science and Technology*, 44(9), 245-252.
- Ogink, N. W. M., Mosquera, J., Calvet, S., & Zhang, G. (2013). Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. *Biosystems Engineering*, 116(3), 297-308.
- Oldenburg J (1989). Geruchs- und Ammoniak-emissionen aus der Tierhaltung [Odour and ammonia emission from animal production.] KTBL-Schrift 333, Kuratorium fuK r technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Darmstadt, Germany, 158pp.
- Organización Interprofesional Agroalimentaria del Porcino de Capa Blanca. (2017). Año histórico en las exportaciones del sector porcino español. <http://www.interporc.com>
- Ortega, J. Antonio. (2015). Estudio del ambiente interior de alojamientos para ganado porcino en fase de transición y su modelizado ARIMA. Tesis doctoral. Universidad de Santiago de Compostela.
- Osada, T., Rom, H.B., Dahl, P.J., 1998. Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photo acoustic detection. *Trans. ASAE* 4, 1109–1114.
- O'Shaughnessy, P. T., C. Achutan, and A. W. Karsten. 2002. Temporal variation of indoor air quality in an enclosed swine confinement building. *J. Agric. Safety Health* 8(4): 349–364.
- Ota, H., Whitehead, J. A., & Davey R.J., 1982. Heat production of male and female piglets. *Proceedings of Second International Livestock Environment Symposium*, SP 03-82, ASAE, St. Joseph, MI.
- Ott, S., Moons, C. P. H., Kashiha, M. A., Bahr, C., Tuytens, F. A. M., Berckmans, D., *et al.* (2014). Automated video analysis of pig activity at pen level highly correlates to human observations of behavioural activities. *Livestock Science*, 160, 132-137.
- Pardo, A., & Ruiz, M. A. (2005). Análisis de datos con SPSS.

- Parsons, D. J., Green, D. M., Schofield, C. P., & Whittemore, C. T. (2007). Real-time control of pig growth through an integrated management system. *Biosystems engineering*, 96(2), 257-266.
- Pearson, C.C., Sharples, T.J., 1995. Airborne dust concentrations in livestock buildings and the effect of feed. *Journal of Agricultural Engineering Research* 60, 145–154.
- Pedersen, S. y C. B. Pedersen. 1995. Animal activity measured by infrared detectors. *Journal of agricultural engineering research* 61 (4): 239-246.
- Pedersen, S., H. Takai, J. O. Johnsen, J. H. M. Metz, P. W. G. G. Koerkamp, G. H. Uenk, V. R. Phillips, *et al.* 1998. A comparison of three balance methods for calculating ventilation rates in livestock buildings. *Journal of agricultural engineering research* 70 (1):25-37.
- Pedersen, S. & Rom, H. B. (1998). Diurnal variation in heat production from pigs in relation to animal activity. In *AgEng Oslo 98, International Conference on Agricultural Engineering, Oslo (Norway), 24-27 Aug 1998. Norges Landbrukshoegskole.*
- Pedersen, S., & Sällvik, K. (2002). Climatization of Animal Houses-Heat and Moisture production at animal and house level 4 th report of CIGR working group. Research Centre Bygholm, Danish Institute of Agricultural Sciences, Horsens, Denmark.
- Pedersen, S., Blanes-Vidal, V., Jørgensen, H., Chwalibog, A., Haeussermann, A., Heetkamp, M. J. W. and Aarnink, A. J. A. (2008). Carbon dioxide production in animal houses: A literature review. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. Manus BC 08 008, vol. X (2008) December. 19 pp.
- Pereira, J., Misselbrook, T. H., Chadwick, D. R., Coutinho, J., & Trindade, H. (2012). Effects of temperature and dairy cattle excreta characteristics on potential ammonia and greenhouse gas emissions from housing: A laboratory study. *biosystems engineering*, 112(2), 138-150.
- Philippe, F. X., Laitat, M., Canart, B., Vandenheede, M., & Nicks, B. (2007). Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. *Livestock Science*, 111(1), 144-152.

- Philippe, F. X., Cabaraux, J. F., & Nicks, B. (2011). Ammonia emissions from pig houses: Influencing factors and mitigation techniques. *Agriculture, ecosystems & environment*, 141(3), 245-260.
- Phillips, V. R., Holden, M. R., Sneath, R. W., Short, J. L., White, R. P., Hartung, J., ... & Takai, H. (1998). The development of robust methods for measuring concentrations and emission rates of gaseous and particulate air pollutants in livestock buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 11-24.
- Phillips, V. R., Lee, D. S., Scholtens, R., Garland, J. A., & Sneath, R. W. (2001). A review of methods for measuring emission rates of ammonia from livestock buildings and slurry or manure stores, Part 2: monitoring flux rates, concentrations and airflow rates. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1), 1-14.
- Portejoie, S., Martinez, J., & Landmann, G. (2002). L'ammoniac d'origine agricole: impacts sur la santé humaine et animale et sur le milieu naturel. *Productions animales*, 15(3), 151-160.
- Predicala, B. Z., Cortus, E. L., Lemay, S. P., & Lague, C. (2007). Effectiveness of a manure scraper system for reducing concentrations of hydrogen sulfide and ammonia in a swine grower-finisher room. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 999-1006.
- Queiroz, M. P. G., Naas, I. D. A., & Sampaio, C. A. D. P. (2005). Estimating thermal comfort for piglets considering ammonia concentration.
- Quiniou, N., Dubois, S., & Noblet, J. (2000). Voluntary feed intake and feeding behaviour of group-housed growing pigs are affected by ambient temperature and body weight. *Livestock Production Science*, 63(3), 245-253.
- Quiniou, N., Noblet, J., Milgen, J. van, & Dubois, S. 2001. Modelling heat and energy balance in group-housed growing pigs exposed to low or high ambient temperatures. *British Journal of Nutrition* 85: 97-106.
- Randall, J. M. 1980. Selection of piggery ventilation system and penning layouts based on the cooling effects of air speed and temperature. *J. Agric. Eng. Res.* 25(2): 169-187.
- Robertson, A. P., Hoxey, R. P., Demmers, T. G. M., Welch, S. K., Sneath, R. W., Stacey, K. F., & Fisher, C. (2002). Commercial-scale studies of the effect of

- broiler-protein intake on aerial pollutant emissions. *Biosystems Engineering*, 82(2), 217-225.
- Rom, H. B., & Dahl, P. J. (1996). A system approach to describe the dynamics of ammonia emission from pig confinement buildings. *EurAgEng Paper 96E-010*, AgEng96, Madrid, Spain, 8pp.
- Saha, C. K., Zhang, G., Kai, P., & Bjerg, B. (2010). Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. *Biosystems Engineering*, 105(3), 279-287.
- Saha, C. K., Ammon, C., Berg, W., Fiedler, M., Loebstin, C., Sanftleben, P., ... & Amon, T. (2014). 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*, 468, 53-62.
- Schauberger, G., Piringer, M., & Petz, E. (2000). Steady-state balance model to calculate the indoor climate of livestock buildings, demonstrated for finishing pigs. *International Journal of Biometeorology*, 43(4), 154-162.
- Schulte, D. D. (1997). Critical parameters for emissions. Ammonia and odour emissions from animal production facilities, 1, 23-34.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H. & Phillips, V. R. (1998a). Temperature and moisture conditions in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 49-57.
- Seedorf, J., Hartung, J., Schröder, M., Linkert, K. H., Pedersen, S., Takai, H. & Phillips, V. R. (1998b). A survey of ventilation rates in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 39-47.
- Seedorf, J., & Hartung, J. (1999). Survey of ammonia concentrations in livestock buildings. *The Journal of Agricultural Science*, 133(4), 433-437.
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Hong, S. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P., ... & Lee, J. W. (2012). Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals. *Biosystems engineering*, 111(1), 91-106.
- Sigrimis, N. A., Arvanitis, K. G., & Pasgianos, G. D. (2000). Synergism of high and low level systems for the efficient management of greenhouses. *Computers and electronics in agriculture*, 29(1), 21-39.

- Soldatos AG, Arvanitis KG, Daskalov PI, Pasgianos GD and Sigrimis N.A., (2005). Non linear robust temperature-humidity control in livestock buildings. *Computers and electronics in agriculture*; 49: 357-376.
- Sousa, P., Pedersen, S., (2004). 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*. Vol.VI.
- Srinath, E. G., & Loehr, R. C. (1974). Ammonia desorption by diffused aeration. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1939-1957.
- Stombaugh, D.P., Teague, H.S., Roller, W.L., 1969. Effects of atmospheric ammonia on the pig. *Journal of Animal Science* 28, 844–847.
- Sun, G., Guo, H.Q., Peterson, J., Predicala, B., Lague, C., 2008. Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms. *Journal of the Air & Waste Management Association* 58, 1434–1448.
- Svennerstedt, B., 1999. Drainage properties and ammonia emissions in slatted floor systems for animal buildings. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72, 19–25.
- Takai, H., S. Nimmermark, T. Banhazi, T. Norton, L. D. Jacobson, S. Calvet, M. Hassouna, *et al.* 2013. Airborne pollutant emissions from naturally ventilated buildings: Proposed research directions. *Biosystems engineering* 116 (3): 214-220.
- Taylor, C. J., Leigh, P., Price, L., Young, P. C., Vranken, E., & Berckmans, D. (2004). Proportional-integral-plus (PIP) control of ventilation rate in agricultural buildings. *Control Engineering Practice*, 12(2), 225-233.
- Timmerman, M., Hoofs, A.I.J., van Wagenberg, A.V., 2003. Ammonia emission from four systems for group-housed sows. In: *Proceedings of the Swine Housing II Conference* ., American Society of Agricultural and Biological Engineers, Saint Joseph, MI, USA, pp. 122–128.
- Timmons, M. B., Gates, R. S., Bottcher, R. W., Carter, T. A., Brake, J., & Wineland, M. J. (1995). Simulation analysis of a new temperature control method for poultry housing. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(4), 237-245.

- Van Dooren, H. J. C., & Mosquera, J. (2010). Measurement of ammonia emissions from three ammonia emission reduction systems for dairy cattle using a dynamic flux chamber.
- Van Breemen, N., Burrough, P.A., Velthorst, E.J., van Dobben, H.F., de Wit, T., Ridder, T.B., Reijnders, H.F.R., 1982. Soil acidification from atmospheric ammonium sulphate in forest canopy throughfall. *Nature* 299, 548–550.
- Van 't Klooster, C.E., Heitlager, B.P., 1994. Determination of minimum ventilation rate in pig houses with natural ventilation based on carbon dioxide balance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57, 279-287.
- Van Ouwerkerk, E.N.J., Aarnink, A.J.A., 1992. Gas production of fattening pigs. International Conference on Agricultural Engineering. Uppsala-Sweden, 1 }4 June.
- Van Ouwerkerk, E. N. J., Pedersen, S. (1994). Application of the carbon dioxide mass balance method to evaluate ventilation rates in livestock buildings. Proc. Xii Cigr'94, Italy, Vol. 1.
- Van Ouwerkerk, E.N.J., Aarnink, A.J.A., 1995. Gasproduktie in vleesvarkensstallen (Gas production in piggeries). Rapport 94-32. IMAG-DLO, Wageningen, the Netherlands.
- Van Ransbeeck, N., Van Langenhove, H., & Demeyer, P. (2013). Indoor concentrations and emissions factors of particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities. *Biosystems engineering*, 116(4), 518-528.
- Van Wagenberg, A. V., and M. A. H. H. Smolders. 2003. Contaminant and heat removal effectiveness of three ventilation systems in nursery rooms for pigs. *Trans. ASAE* 45(6): 1985–1992.
- Van Wagenberg, A. V., B. Bjerg, and G. P. A. Bot. 2004. Measurements and simulation of climatic conditions in the animal-occupied zone in a door-ventilated room for piglets. *CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript BC 03 020. Vol. VI, April 2004
- Van Wagenberg, A. V., Aerts, J. M., Van Brecht, A., Vranken, E., Leroy, T., & Berckmans, D. (2005). Climate control based on temperature measurement in the animal-occupied zone of a pig room with ground channel ventilation. *Transactions of the ASAE*, 48(1), 355-365.

- Voorburg, J. H., & Kroodsma, W. (1992). Volatile emissions of housing systems for cattle. *Livestock Production Science*, 31(1), 57-70.
- Vranken, E., D. Berckmans y V. Goedseels. 1996. *New possibilities for bioenvironmental control in livestock buildings*, editado por Zazueta, F. S. Martinez, y P. Xin y J. N. GarciaVillanueva.
- Wachenfelt, E.V., Pedersen, S. & Gustafsson, G. 2001. Release of heat, moisture and carbon dioxide in an aviary system for laying hens. *British Poultry Science* (2001) 42: 171-179.
- Wang, K., Wei, B., Zhu, S., & Ye, Z. (2011). Ammonia and odour emitted from deep litter and fully slatted floor systems for growing-finishing pigs. *Biosystems engineering*, 109(3), 203-210.
- Warriss, P. D. (2003). Optimal lairage times and conditions for slaughter pigs: a review. *The Veterinary Record*, 153(6), 170-176.
- Weaver Jr, W. D., & Meijerhof, R. (1991). The effect of different levels of relative humidity and air movement on litter conditions, ammonia levels, growth, and carcass quality for broiler chickens. *Poultry Science*, 70(4), 746-755.
- Weeks, C. A. (2008). A review of welfare in cattle, sheep and pig lairages, with emphasis on stocking rates, ventilation and noise. *Animal Welfare*, 17(3), 275-284.
- Whyte, R.T., 1993. Aerial pollutants and the health of poultry farmers. *World's Poultry Science Journal* 49, 139–156.
- Ye, Z., Zhang, G., Seo, I.H., Kai, P., Saha, C.K., Wang, C., Li, B., 2009. Airflow characteristics at the surface of manure in a storage pit affected by ventilation rate, floor slat opening, and headspace height. *Biosystems Engineering* 104, 97–105.
- Zervas, S., & Zijlstra, R. T. (2002). Effects of dietary protein and fermentable fiber on nitrogen excretion patterns and plasma urea in grower pigs. *Journal of animal science*, 80(12), 3247-3256.
- Zhang Y. (1994): *Swine building ventilation: A Guide for confinement swine housing in cold climates*. Prairie Swine Centre. Saskatoon, Canada, 144 pp.
- Zhang, Y. H., X. Wang, G. L. Riskowski y L. L. Christianson. 2001. Quantifying ventilation effectiveness for air quality control. *Transactions of the ASAE* 44 (2): 385-390.

Zhang, G., Strom, J.S, Li, B., Rom, H.B., Morsing, S., Dahl, P., Wang, C. (2005). Emission of ammonia and other contaminant gases from naturally ventilated dairy cattle buildings. *Biosystem Engineering* 92 (3): pp 355-364.

Zhang, S. R., Wang, J. H., Dong, D. M., Zheng, W. G., & Zhao, X. D. (2013). A review of contact sensors used for monitoring malodorous gas in animal facilities. In *Advanced Materials Research* (Vol. 629, pp. 655-661). Trans Tech Publications.



# Apéndice

---





## Apéndice.

### CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, ENERGÉTICA Y PRODUCTIVA DE LA SALA

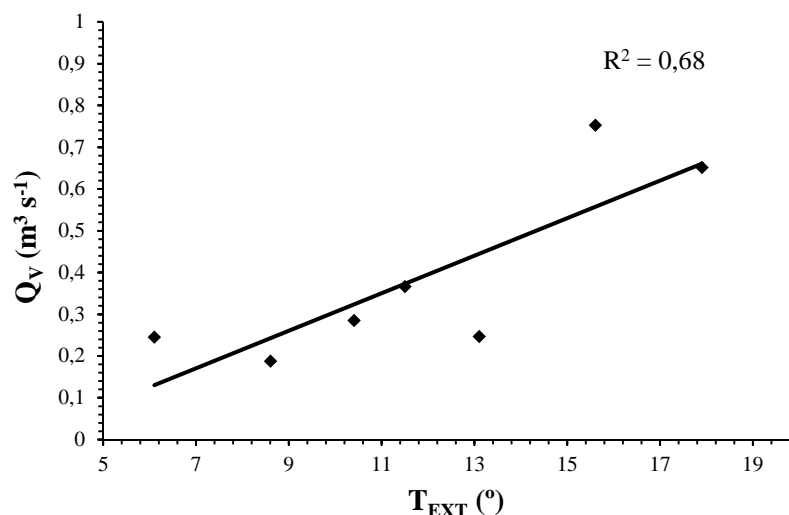


Figura A- 1. Relación lineal entre la temperatura media exterior ( $T_{EXT}$ ) y el caudal medio de aire extraído por el ventilador ( $Q_V$ ).

Tabla A- 1. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo I.

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	1,00	-0,50*	-0,44*
$T_{ZA}$	-0,50*	1,00	0,64*
$T_{EXT}$	-0,44*	0,64*	1,00

\*\* $\rho > 0,01$ . \* $R^2 = 0,41$

Tabla A-2. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo II.

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	1,00	-0,57*	-0,33*
$T_{ZA}$	-0,57*	1,00	0,46*
$T_{EXT}$	-0,33*	0,46*	1,00

\*\* $\rho > 0,01$ . \* $R^2 = 0,21$

**Tabla A-3. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo III.**

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	-	-	-
$T_{ZA}$	-	1,00	0,60*
$T_{EXT}$	-	0,60*	1,00

\*\* $\rho > 0,01$ .  $R^2 = 0,36$

**Tabla A-4. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo IV.**

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	-	-	-
$T_{ZA}$	-	1,00	0,63*
$T_{EXT}$	-	0,63	1,00

\*\* $\rho > 0,01$ .  $R^2 = 0,40$

**Tabla A-5. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo V.**

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	-	-	-
$T_{ZA}$	-	1,00	0,40*
$T_{EXT}$	-	0,40*	1,00

$\rho > 0,01$  para todas las correlaciones  
\*\* $R^2 = 0,16$

**Tabla A-6. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo VI.**

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	-	-	-
$T_{ZA}$	-	1,00	0,74*
$T_{EXT}$	-	0,74*	1,00

\*\* $\rho > 0,01$ .  $R^2 = 0,55$

**Tabla A-7. Correlación entre la humedad relativa en la zona animal ( $RH_{ZA}$ ), temperatura en zona animal ( $T_{ZA}$ ) y temperatura exterior ( $T_{EXT}$ ) para el ciclo VII.**

	$RH_{ZA}^{**}$	$T_{ZA}^{**}$	$T_{EXT}^{**}$
$RH_{ZA}$	1	-0,70*	-0,45*
$T_{ZA}$	-0,70*	1	0,74*
$T_{EXT}$	-0,45*	0,74*	1

\*\* $\rho > 0,01$ .  $R^2 = 0,55$

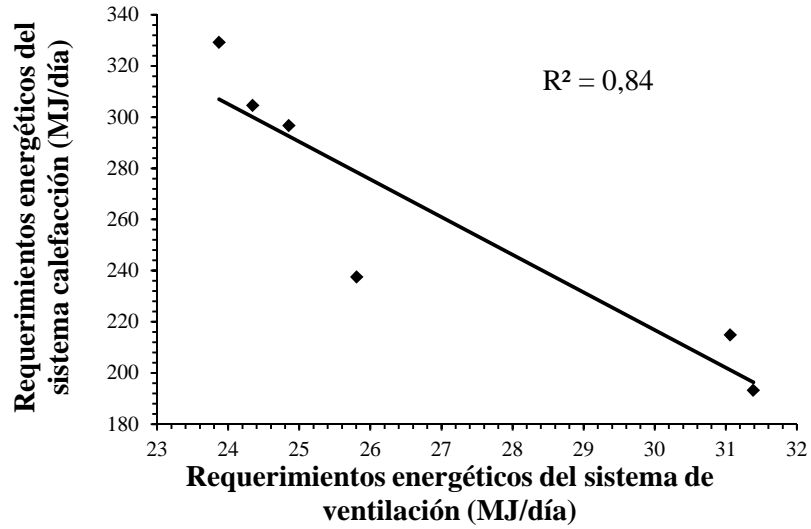


Figura A-2. Relación lineal entre los requerimientos energéticos medios diarios de los sistemas de ventilación y calefacción.

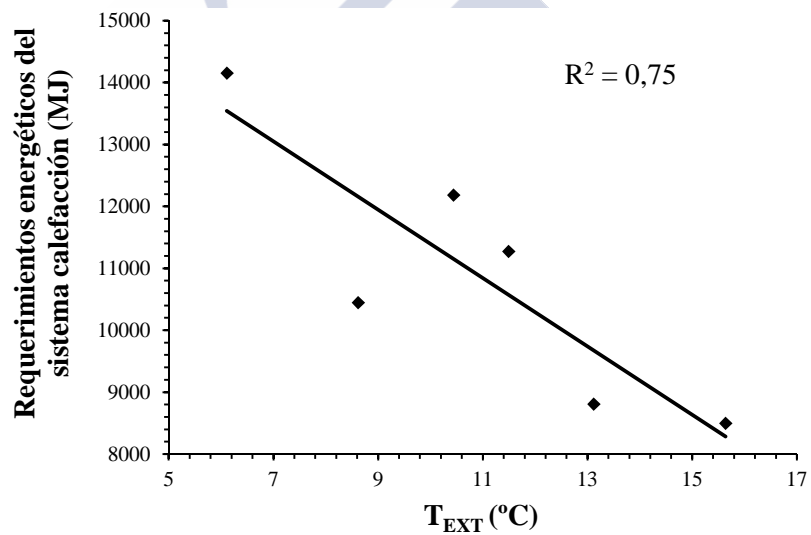


Figura A-3. Relación lineal entre la temperatura media exterior y los requerimientos energéticos del sistema calefacción por ciclos.

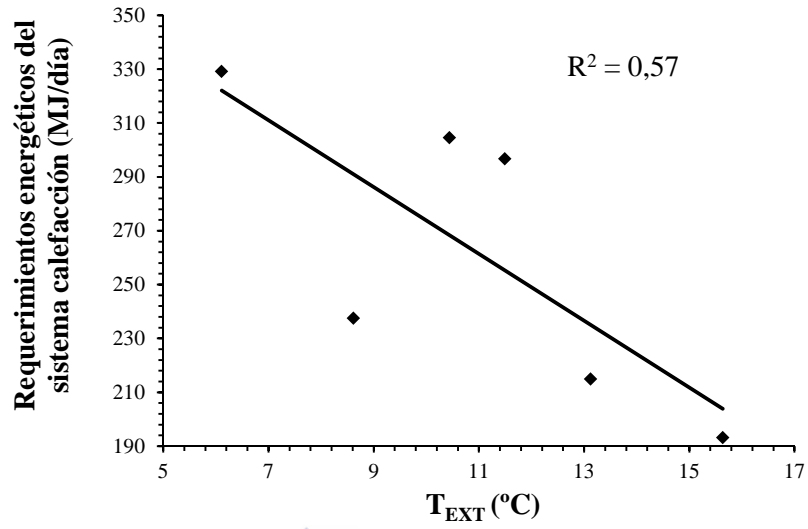


Figura A-4. Relación lineal entre la temperatura media exterior ( $T_{EXT}$ ) y los requerimientos energéticos medios diarios del sistema calefacción.

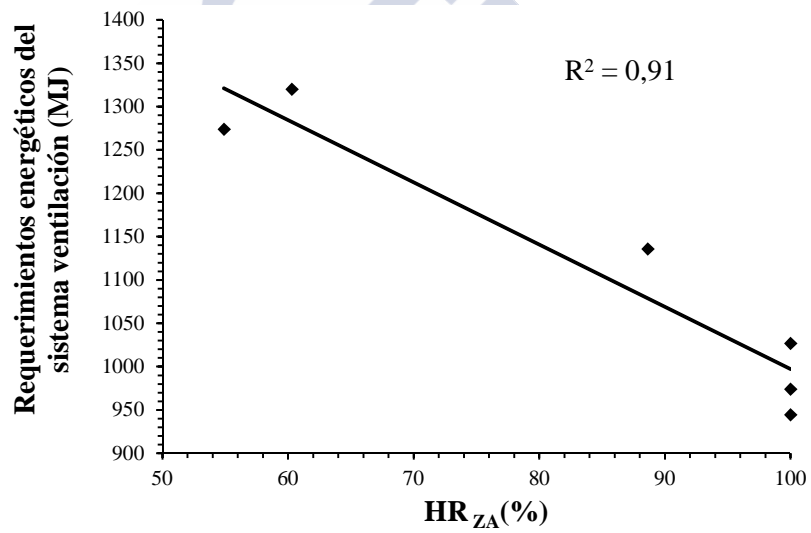


Figura A- 5. Relación lineal entre la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y los requerimientos energéticos del sistema de ventilación por ciclos.

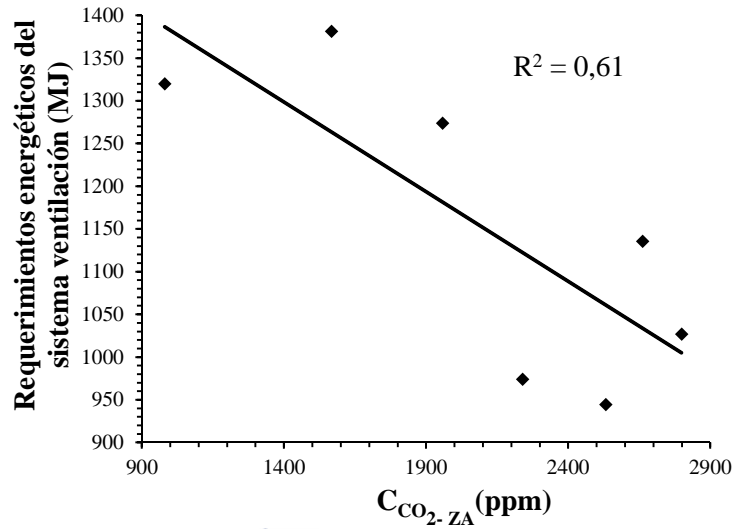


Figura A-6. Relación lineal entre la concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y los requerimientos energéticos del sistema de ventilación por ciclos.

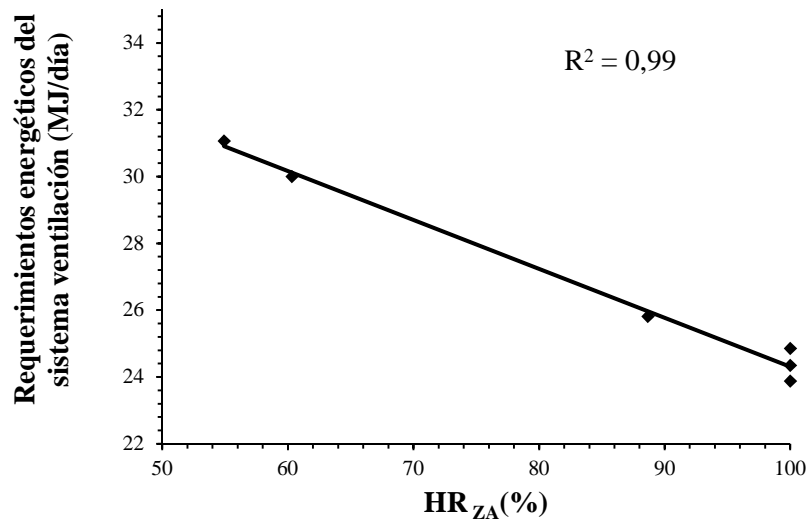


Figura A- 7. Relación lineal entre la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y los requerimientos medios diarios energéticos del sistema de ventilación.

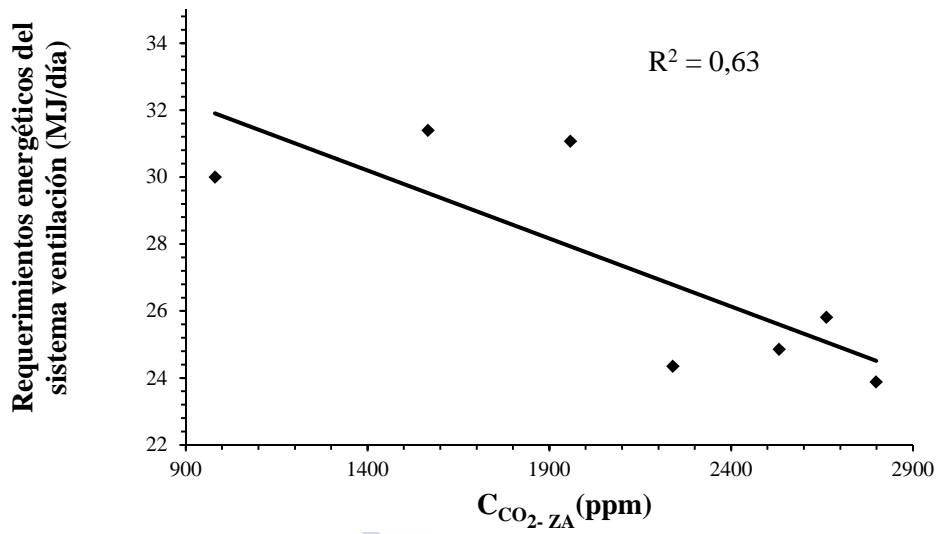


Figura A-8. Relación lineal entre la concentración en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y los requerimientos energéticos medios diarios del sistema de ventilación.

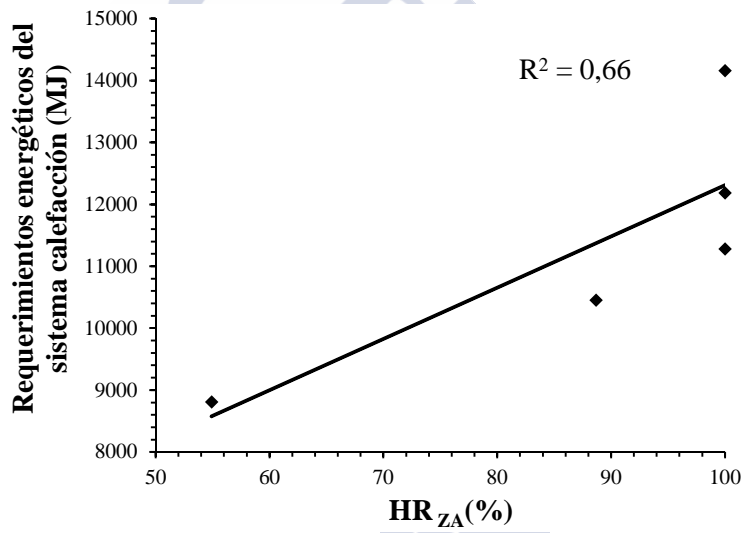


Figura A-9. Relación lineal entre la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y los requerimientos energéticos del sistema de calefacción por ciclos.

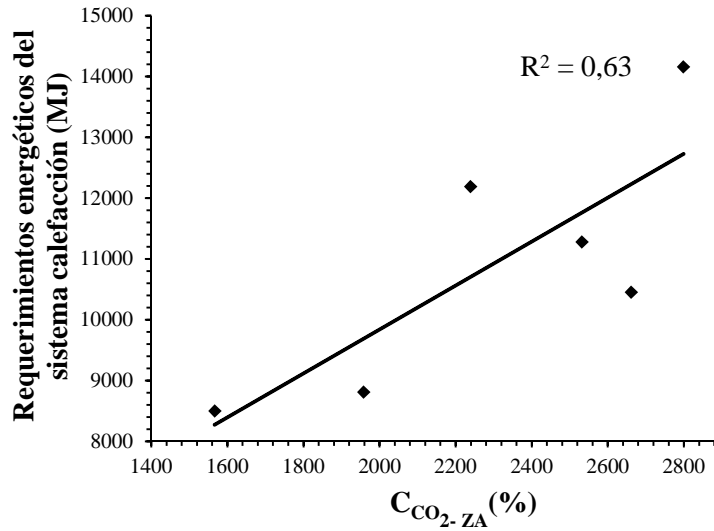


Figura A-10. Relación lineal entre la concentración de  $CO_2$  en zona animal ( $C_{CO_2-ZA}$ ) y los requerimientos energéticos del sistema de calefacción por ciclos.

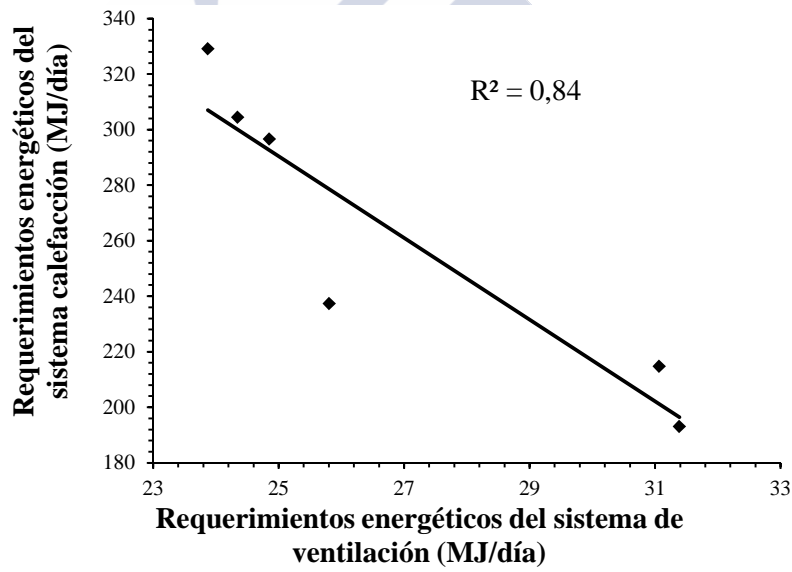


Figura A-11. Relación lineal entre la humedad relativa en zona animal ( $HR_{ZA}$ ) y los requerimientos energéticos medios diarios del sistema de calefacción por ciclos.

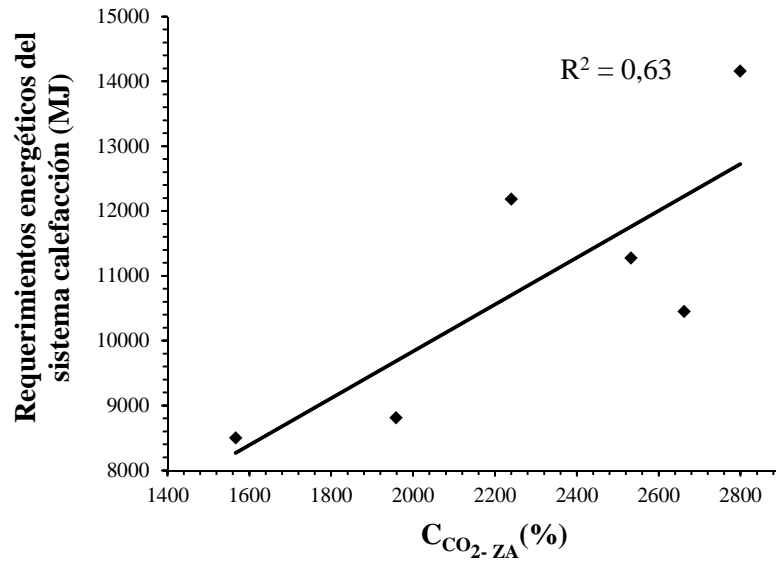
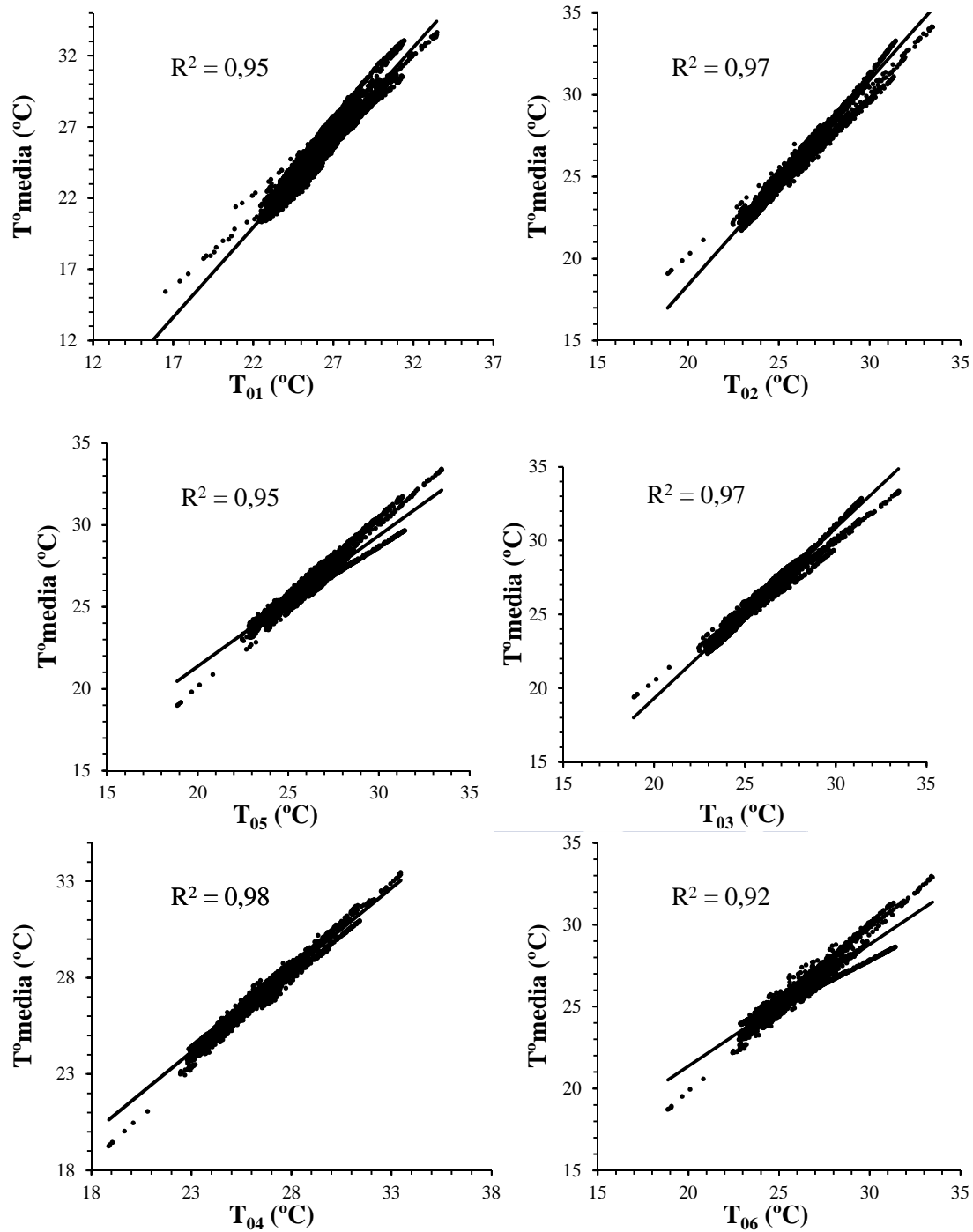


Figura A-12. Relación lineal entre la concentración de CO<sub>2</sub> en zona animal (C<sub>CO<sub>2</sub>-ZA</sub>) y los requerimientos energéticos del sistema de calefacción por ciclos.





**Figura A-13. Relación lineal entre las temperaturas medidas a un metro y su media según la distancia a la entrada de aire:  $T_{01}$  (a 1 m),  $T_{02}$  (a 3 m),  $T_{03}$  (a 5 m),  $T_{04}$  (7 m),  $T_{05}$  (9 m) y  $T_{06}$  (11 m) medidas a 1 m de altura y la media en función de la distancia a la entrada de aire.**