



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

**MODELACIÓN DE TEMPERATURA Y AMONÍACO EN UNA GRANJA
CUNÍCOLA MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL**

TESIS DE GRADO

Que como requisito parcial

para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

Presenta:

DAVID VARGAS CANO

Bajo la supervisión de: DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2019.

MODELACIÓN DE TEMPERATURA Y AMONÍACO EN UNA GRANJA
CUNÍCOLA MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Tesis realizada por **DAVID VARGAS CANO** bajo la supervisión del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener
el grado de:

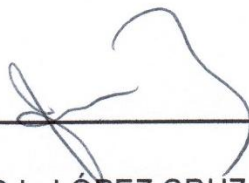
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR



DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR



DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR



DR. JORGE FLORES VELAZQUEZ

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Objetivo general.	3
1.2. Objetivos particulares	3
1.3. Estructura de la tesis.	3
1.4. Literatura citada.....	4
2. LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN LA MODELACIÓN DE INSTALACIONES PECUARIAS: ESTADO DEL ARTE	7
2.1. Introducción	7
2.2. Dinámica de fluidos computacional	10
2.3. Modelación de instalaciones con ventilación natural.....	13
2.4. Modelación de instalaciones con ventilación mecánica	20
2.5. Modelaciones pecuarias que no incluyen una instalación	25
2.6. Conclusiones	27
2.7. Literatura citada.....	28

3. SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y AMONÍACO BASADO EN ARDUINO APLICADO A UNA INSTALACIÓN CUNÍCOLA.....	34
3.1. Introducción.....	34
3.2. Materiales y métodos.	36
3.2.1 Descripción del sistema	36
3.2.2. Diseño del circuito.....	36
3.2.3. Calibración	39
3.2.4. Evaluación del sistema	39
3.3. Resultados y discusión.....	40
3.3.1 Comportamiento de los sensores	42
3.4. Conclusiones.....	46
3.5. Agradecimientos.....	47
3.6. Literatura citada.....	47
4. SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) DEL AMBIENTE DE UNA INSTALACIÓN CUNÍCOLA	51
4.1. Introducción.....	51
4.2. Materiales y métodos	53
4.2.1. Descripción del experimento.....	53
4.2.2. Construcción del modelo numérico.....	55
Geometría y dominio computacional	55

Mallado.....	55
Condiciones de frontera	56
Ecuaciones que gobiernan y procedimiento numérico	57
Evaluación del modelo numérico	58
4.3. Resultados y discusión.....	60
4.3.1. Variación de la velocidad del aire y la concentración de amoníaco en la ZOA.....	60
4.3.2. Variación vertical de la concentración de amoníaco y temperatura del aire.....	61
Amoníaco y temperatura en la sección transversal A.....	61
Amoníaco y temperatura en la sección transversal B	62
Amoníaco y temperatura en la sección transversal C	62
4.4. Conclusiones.....	64
4.5. Literatura citada.....	65

LISTA DE CUADROS

CAPÍTULO 2

Cuadro 1. Modelos de turbulencia (RANS) y una breve descripción (ANSYS, 2010; Andre Bakker & Marden Marshall, 2016).	13
--	----

CAPÍTULO 3

Cuadro 1. Datos técnicos de los sensores de amoníaco, temperatura y humedad utilizados en el sistema desarrollado para el monitoreo de una instalación cunícola.	36
---	----

Cuadro 2. Componentes utilizados en el diseño y desarrollo del circuito para medición de variables ambientales de una instalación cunícola.....	37
---	----

CAPÍTULO 4

Cuadro 1. Ubicación de los sensores al interior de la granja cunícola, en coordenadas cartesianas respecto al origen observado en la Figura 1.	55
---	----

Cuadro 2. Resumen de las condiciones de frontera usadas durante la simulación.	57
---	----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 1. Elementos principales de un software CFD y sus características..... 11

Figura 2. Escalas de transferencia de energía en modelado de turbulencia (DNS, LES y RANS) (Bakker, 2004). 12

Figura 3. Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional en instalaciones pecuarias con ventilación natural. A) Modelo usado en los trabajos de Norton, Grant, Fallon, & Sun (2010c). B) Simulación CFD de un modelo que incluye la geometría del animal y modelo virtual simplificado de un cerdo (Bjarne Bjerg, Cascone, et al., 2013; Seo et al., 2012). C) Instalación avícola y dominio computacional (Rojano et al., 2016, 2019). D) Modelo de 7 instalaciones comerciales de vacas lecheras usados para simulación CFD (Sapounas et al., 2013). 16

Figura 4. Geometrías de los trabajos de Hao Li. A) Edificio experimental de cerdos y divisiones del dominio computacional (dimensiones en metros). B) Modelo artificial de un cerdo (Li et al., 2018; Li, Rong, & Zhang, 2017). 24

Figura 5. Geometría de los animales usados en simulaciones CFD. A) Dominio computacional y modelo virtual de 10 vacas (Gebremedhin & Wu, 2003). B) Modelo de cerdo a tamaño real y flujo a diferentes orientaciones del animal en el dominio computacional (Li, Rong, & Zhang, 2016). C) Modelo de ave doméstica y flujo de aire a diferentes orientaciones (Li, Rong, Zong, et al., 2016). D) Modelo virtual de una vaca en diferentes posiciones; parada y con extremidades, parada sin extremidades, y reclinada (Wang et al., 2018). 25

CAPÍTULO 3

Figura 1. Planteamiento de comunicación de los componentes utilizados para el desarrollo del sistema de sensores: A) Diagrama de comunicación entre los

componentes, B) Arduino Nano y los pines utilizados por cada uno de los módulos y sensores para el desarrollo.	39
Figura 2. Distribución espacial de los sensores de amoniaco (1, 4, 7, 9, 11 y 13), temperatura y humedad (1-13) en el interior de la instalación cunícola para la evaluación del sistema.....	40
Figura 3. Diagrama electrónico de la placa madre del sistema para monitoreo de variables ambientales de una instalación cunícola. A) circuito principal, B) circuito auxiliar.....	41
Figura 4. Placas de circuito impreso con los componentes soldados, basados en los diseños de los circuitos desarrollados, 3 placas principales y 15 auxiliares.	42
Figura 5. Comparación entre 30 muestras de temperatura tomadas con 15 sensores DHT22 y 1 MLX90614 (GY-906).....	43
Figura 6. Comparación de 30 muestras de humedad tomadas con 15 sensores DHT22.	43
Figura 7. Curva de sensibilidad de los sensores MQ-137 y valores Ro encontrados de 6 sensores.....	44
Figura 8. Resumen estadístico de 5 días, los puntos muestreados se promediaron y se obtuvieron los valores mínimos, máximos, media aritmética, mediana y desviación estándar (SD) de las variables ambientales medidos. a) amoniaco, b) temperatura, y c) humedad.....	44
Figura 9. Concentración de amoniaco, temperatura y porcentaje de humedad de una instalación cunícola, correspondiente al 12 de Julio de 2019, registrado por los dispositivos desarrollados.	46

CAPÍTULO 4

Figura 1. Características de la granja cunícola experimental.	54
--	----

Figura 2. Temperatura muestreada en el eje z en el centro de la instalación y RMSE calculado para 5 diferentes cantidades de elementos en el mallado.....	56
Figura 3. Comparación entre datos medidos y simulados para amoniaco y temperatura.....	58
Figura 4. ZOA y planos transversales creados para el análisis de gradiente térmico y concentración de amoniaco.....	59
Figura 5. Velocidad del aire y concentración de amoniaco: A. Dirección del viento a 0°, B. Dirección del viento a 45° y C. Dirección del viento a 90°.....	61
Figura 6. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal A.	63
Figura 7. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal B.	63
Figura 8. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal C.....	64

DEDICATORIAS

A mi querida madre

Margarita Cano Marcial

A mi tía Angela y mi primo Magdiel por su apoyo incondicional y siempre alentarme a seguir superándome.

A mi amada familia (Elizabeth, Dulce, Pedro, Elí, “Viki”, etc.).

A todos mis amigos con los cuales he convivido durante mi estancia en Chapingo, principalmente a Adrián, “Metz”, “Chuy”, “Gama”, “Juanito” y “Kike”

Y a todos aquellos amigos que no mencione, pero no por eso son menos importantes.

AGRADECIMIENTOS

En este apartado me permito agradecer a las personas e instituciones que hicieron posible mi formación y la realización del presente trabajo, entre ellos:

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por el apoyo brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de UACH, por permitirme formar parte de su proyecto educativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo de beca para la realización de mis estudios de maestría.

Al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por el apoyo de beca para la realización de este trabajo.

Al Dr. Agustín Ruiz García, ya que, gracias a su gran ayuda, acertada dirección, consejo y sugerencias hizo posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Irineo L. López Cruz y Dr. Jorge Flores Velázquez por sus valiosas observaciones realizadas al presente trabajo.

Al M.I. Jesús Antonio García Martínez y M.C. Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez por su invaluable ayuda durante la elaboración de este trabajo.

A todas aquellas personas que de manera desinteresada me brindaron su apoyo durante la realización de este trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

David Vargas Cano nace en Choapam Oaxaca un 29 de diciembre de 1993, realizó sus estudios de primaria en la escuela Aquiles Serdán en el municipio de Santiago Choapam Oaxaca. Cursó sus estudios de secundaria en la escuela Secundaria Técnica No. 128 e ingresó al Bachillerato Integral Comunitario 05 para realizar sus estudios de nivel media superior, el cual concluyó exitosamente en el año 2011 en el mismo municipio.

En el año 2011 aprueba el examen de ingreso al Propedéutico en la Universidad Autónoma Chapingo, para el año 2012 se integra a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en la misma Universidad, egresando en el año 2016 y titulándose en el mes de abril del siguiente año.

En el año 2017 se postula para ingresar al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, donde es aceptado y se integra al área de biosistemas con el tema de investigación Modelación de temperatura y concentración de amoníaco en una granja cunícola mediante dinámica de fluidos computacional.

RESUMEN GENERAL

MODELACIÓN DE TEMPERATURA Y AMONÍACO EN UNA GRANJA CUNÍCOLA MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL¹

En México la crianza de conejos se lleva a cabo en construcciones rústicas. Al carecer de un diseño adecuado, la granja presenta problemas ambientales, como altas temperaturas y concentraciones elevadas de gases nocivos a consecuencia de una inadecuada tasa de ventilación. Lograr un ambiente dentro de rangos óptimos para el conejo, es una necesidad para evitar problemas de crecimiento y reproducción. El objetivo de este trabajo fue analizar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) la distribución de la temperatura y concentración de amoníaco en el interior de una granja de conejos ubicada en Chapingo, México. La investigación se realizó en dos etapas, primero se desarrolló e instaló un sistema de monitoreo basado en Arduino, en una instalación cunícola. En la segunda etapa se desarrolló un modelo CFD, el cual fue evaluado con datos experimentales medidos durante el mes de julio de 2019. La raíz del cuadrado medio del error (RMSE) entre datos medidos y simulados fue 1.16 en amoníaco y 0.41 en temperatura. Se evaluó el efecto de tres ángulos de incidencia del viento sobre la instalación (0°, 45° y 90°). Los resultados indicaron mejor distribución de temperatura y amoníaco cuando el ángulo de incidencia del viento fue de 45° respecto a las ventanas. La temperatura interna fue de 2 °C menos que la externa y la concentración de amoníaco de 10 a 13 ppm, la cual se encuentra por debajo del límite máximo recomendado de 25 ppm.

Palabras clave: Arduino, Ansys Fluent, volumen finito, conejos.

¹ Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

Autor: Vargas-Cano David

Director de Tesis: Ruiz-García Agustín.

GENERAL ABSTRACT

MODELLING OF TEMPERATURE AND AMMONIA IN A RABBIT FARM USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS²

In Mexico the breeding of rabbits is carried out in rustic buildings. In the absence of an adequate design, the farm presents environmental problems, such as high temperatures and high concentrations of noxious gases as a result of an inadequate ventilation rate. To obtain an environment in optimal ranges for the rabbit is a necessity to avoid problems of growth and reproduction. The objective of this work was to analyze using computational fluid dynamics (CFD) the distribution of temperature and ammonia concentration inside a rabbit farm located in Chapingo, Mexico. The research was done in two stages, first a monitoring system based on Arduino was developed and installed in a rabbit barn. In the second stage, a CFD model was developed, this was evaluated with experimental data measured during July 2019. The root-mean-square error (RMSE) between measured and simulated data was 1.16 in ammonia and 0.41 in temperature. The effect of three angles of wind incidence on the building (0°, 45° and 90°) was evaluated. The results showed a better distribution of temperature and ammonia when the angle of incidence of the wind was 45° in respect of the windows. The internal temperature was 2 °C less than the external temperature and the ammonia concentration was 10 to 13 ppm, which is below the recommended maximum limit of 25 ppm.

Key words: Arduino, Ansys Fluent, finite volume, rabbits.

² Thesis, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Vargas-Cano David

Advisor: Ruiz-García Agustín

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción cunícola cuenta con características específicas en comparación con la producción de otros ganados, entre las que destacan que los conejos son de tamaño pequeño, son muy productivos, con periodos breves de gestación y lactancia, rápido crecimiento, diversidad genética y la capacidad de utilizar forraje como componentes principales de su dieta (Camps, 2000; FAO, 1999). La carne de conejo es alta en proteínas y baja en grasas (Baiomy & Hassanien, 2011; Mailafia, Onakpa, & Owoleke, 2011), y con el aumento de la población mundial Camps (2000) afirma que la carne de conejo sería la fuente principal de alimento para los millones de personas en los países de desarrollo. Además, la cunicultura es una actividad que permite al productor recuperar rápidamente su inversión (Olivares Pineda, Gómez Cruz, Schwentesius Rindermann, & Carrera Chávez, 2017), no obstante para Cullere y Dalle Zotte (2018), la industria de la carne de conejo se enfrenta a un periodo crítico, complejo y desafiante, que se caracteriza por una progresiva reducción en el consumo.

En México la mayor producción de conejos se encuentra en la zona central del país y la mayoría de los criaderos pertenecen a productores familiares de pequeña escala, donde los criadores utilizan un edificio rústico que carece de un sistema de ventilación basado en un diseño ingenieril, lo que provoca bajas tasas de ventilación y consecuentemente altas temperaturas y concentraciones de amoníaco durante todo el año, debido a la degradación de la orina y excremento (Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Lara-Mireles, Montero, & Rojano, 2013; Martínez et al., 2004). La temperatura por debajo de la zona de confort térmico provoca estrés por frío y por encima de la zona de confort térmico estrés por calor (Ames, 1980). Sobre el estrés por calor, Morrison (1983), afirma que además de la temperatura alta, esta se intensifica por humedad alta, radiación térmica y bajo movimiento del aire. La importancia de la velocidad del aire toma mayor relevancia en instalaciones con ventilación natural, debido a que las condiciones climáticas que rodean al edificio son los factores principales que determinan la

tasa de ventilación y muy probablemente, la tasa de emisión de gases (Ngwabie, Jeppsson, Nimmermark, Swensson, & Gustafsson, 2009). Los conejos son muy susceptibles a las altas temperaturas, que afectan adversamente el crecimiento y aspectos reproductivos, y reduce la resistencia a las enfermedades, debido a que tienen pocas glándulas sudoríparas funcionales y presentan dificultades en la eliminación del exceso de calor del cuerpo (Bodnar, Makra, Bodnar, & Privoczki Z., 2019; Marai, Habeeb, & Gad, 2002). Las concentraciones elevadas de amoníaco en el aire que respiran los conejos (de 20 a 30 ppm), altera la integridad de las vías respiratorias superiores y permite la proliferación de bacterias como las pasteurelas o las bordetelas (Lebas, 1996). El amoníaco además es considerado como la principal fuente de nitrógeno en la atmósfera, y una de las principales fuentes de generación de amoníaco son los alojamientos para animales (Krupa, 2003; Sanchis, Calvet, Prado, & Estellés, 2019).

El estudio de la ventilación de las instalaciones pecuarias ha sido abordado por diversos autores y mediante distintos métodos, destacando las mediciones directas, el método de gas trazador y las técnicas CFD (Wu, Zhai, Zhang, & Nielsen, 2012). Las mediciones en campo generalmente demandan mucho tiempo y los equipos comerciales son de alto costo. Arduino es una plataforma abierta de bajo costo, que desde su lanzamiento en 2005, su uso se ha vuelto cada vez más popular en la comunidad científica, eso y su compatibilidad con una gran variedad y tipos de sensores, lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones relacionadas con el monitoreo ambiental (Cressey, 2017; Ferdoush & Li, 2014; González-Buesa & Salvador, 2019). Sin embargo, la medición directa de los parámetros ambientales presenta varios inconvenientes, por ejemplo que, los puntos que se puede medir son limitados, las herramientas utilizadas interfieren con la velocidad del aire o se ubican en lugares alejados de las zonas de interés para evitar el contacto con los animales y daños al equipo; por lo tanto, las mediciones no son representativas y tales estudios generalmente no proporcionan conclusiones universales (Du et al., 2019; Wang, Zhao, He, & Wang, 2019).

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las herramientas de modelado ampliamente utilizadas para el estudio de ambientes en instalaciones agrícolas y pecuarias, esta herramienta proporciona posibilidades potenciales para manejar todas las condiciones importantes que pueden influir en el entorno climático interno de una edificación pecuaria (Bjerg, Svidt, Zhang, & Morsing, 2000). Las aplicaciones de CFD en construcciones para producción de conejos son pocos, entre las que destacan las simulaciones realizadas por Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Ojeda y Ruiz-García (2017), sobre el gradiente de temperatura y concentración de amoníaco en dos diseños de una instalación ventilada naturalmente y aquellas llevadas a cabo por Jin et al. (2018), acerca de la distribución del flujo de aire del ambiente interno de una instalación pequeña utilizada en China.

1.1. Objetivo general.

Analizar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) la distribución de la temperatura y concentración de amoníaco en el interior de una granja de conejos.

1.2. Objetivos particulares

Realizar una revisión de literatura sobre las aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional en el ámbito pecuario.

Desarrollar e implementar un sistema de monitoreo de temperatura, humedad y amoníaco basado en Arduino aplicado a una instalación cunícola

Simular mediante dinámica de fluidos computacional la distribución de la temperatura y concentración de amoníaco de una instalación cunícola ventilada naturalmente.

1.3. Estructura de la tesis.

El trabajo de investigación se desarrolló en tres etapas. La primera (Capítulo 2) consistió en llevar a cabo una revisión del estado del arte sobre las aplicaciones

de la dinámica de fluidos computacional en la modelación del ambiente de instalaciones pecuarias con ventilación natural y ventilación mecánica. La segunda etapa (Capítulo 3), consistió en desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura, humedad y concentración de amoníaco basado en Arduino, e implementarlo en una instalación cunícola ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo, México. En la tercera etapa (Capítulo 4), se realizaron simulaciones mediante CFD para determinar el efecto en la distribución de la temperatura y concentración de amoníaco de tres diferentes ángulos de incidencia del viento sobre la instalación cunícola.

1.4. Literatura citada

- Ames, D. (1980). Thermal environment affects production efficiency of livestock. *BioScience*, 30(7), 457–460. <https://doi.org/10.2307/1307947>
- Baiomy, A., & Hassanien, H. (2011). Effect of breed and sex on carcass characteristics and meat chemical composition of New Zealand white and Californian rabbits under upper Egyptian environment. *Egyptian Poultry Science*, 31(2), 275–284.
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., & Morsing, S. (2000). Structures and environment: the effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(3), 317–326. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0596>
- Bodnar, K., Makra, L., Bodnar, G., & Privoczki Z., I. (2019). A review on environmental management of rabbit production. *Agricultural Management/Lucrari Stiintifice Seria I, Management Agricol*, XXI (1), 5–12.
- Camps, J. (2000). Beneficios de las características nutricionales de la carne de conejo para la salud humana. *Cunicultura*, 25(146), 188–192. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/20542663.pdf>
- Cressey, D. (2017). The DIY electronics transforming research. *Nature*, 544(7648), 125–126. <https://doi.org/10.1038/544125a>
- Cullere, M., & Dalle Zotte, A. (2018). Rabbit meat production and consumption: State of knowledge and future perspectives. *Meat Science*, 143, 137–146. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.04.029>
- Du, L., Yang, C., Dominy, R., Yang, L., Hu, C., Du, H., et al. (2019). Computational fluid dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated

- poultry house in China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 159(7), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.020>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1999). Cría de conejos para obtener alimentos e ingresos. Recuperado de <http://www.fao.org/Noticias/1999/990101-s.htm>
- Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless sensor network system design using Raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103–110. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2014.07.059>
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Lara-Mireles, J. L., Montero, J. I., & Rojano, F. (2013). Climate behavior of a rabbit barn in Central Mexico by using Computational Fluid Dynamics (CFD). *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2013, ASABE 2013*, 4(August 2018), 3319–3325. <https://doi.org/10.13031/aim.20131617903>
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Ojeda, W., & Ruíz-García, A. (2017). Thermal and ammonia concentration gradients in a rabbit barn with two ventilation system designs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 134–140. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p134-140>
- González-Buesa, J., & Salvador, M. L. (2019). An Arduino-based low cost device for the measurement of the respiration rates of fruits and vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162(2018), 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.029>
- Jin, N., Zheng, M., Chen, J., Duan, E., Kong, D., Wang, H., & Fang, P. (2018). Study on the indoor environmental simulation and optimal design of rabbit houses in winter based on CFD. *American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2018, ASABE 2018*, 1. <https://doi.org/10.13031/aim.201800350>
- Krupa, S. (2003). Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: A review. *Environmental Pollution*, 124(2), 179–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)
- Lebas, F., Coudert, P., de Rochambeau, H., & Thébault, R. G. (1996). El conejo: cría y patología. Recuperado de <http://www.fao.org/3/t1690s/t1690s.pdf>
- Mailafia, S., Onakpa, M., & Owoleke, O. (2011). Problems and prospects of rabbit production in Nigeria - a review. *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences*, 3(2), 20–25. <https://doi.org/10.4314/bajopas.v3i2.63213>
- Marai, I. F., Habeeb, A. A., & Gad, A. (2002). Rabbits' productive, reproductive

- and physiological performance traits as affected by heat stress: A review. *Livestock Production Science*, 78(2), 71–90.
[https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00091-X)
- Martínez, F., Becerril, P. C. M., Pro, M. A., García, D. G., García, M. R., & Cuca, G. M. (2004). Rabbit production in small rabbitries in Texcoco Mexico. *In Memory of 8th World Rabbit Congress. Puebla*, 1208-1211.
- Morrison, S. R. (1983). Ruminant heat stress: effect on production and means of alleviation. *Journal of Animal Science*, 57(6), 1594–1600.
<https://doi.org/10.2527/jas1983.5761594x>
- Ngwabie, N. M., Jeppsson, K. H., Nimmermark, S., Swensson, C., & Gustafsson, G. (2009). Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. *Biosystems Engineering*, 103(1), 68–77.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.004>
- Olivares Pineda, R., Gómez Cruz, M. Á., Schwentesius Rindermann, R., & Carrera Chávez, B. (2017). Alternativas a la producción y mercadeo para la carne de conejo en Tlaxcala, México. *Región y Sociedad*, 21(46).
<https://doi.org/10.22198/rys.2009.46.a482>
- Sanchis, E., Calvet, S., Prado, A., & Estellés, F. (2019). A meta-analysis of environmental factor effects on ammonia emissions from dairy cattle houses. *Biosystems Engineering*, 178, 176–183.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.017>
- Wang, X., Zhao, X., He, Y., & Wang, K. (2019). Cough sound analysis to assess air quality in commercial weaner barns. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.001>
- Wu, W., Zhai, J., Zhang, G., & Nielsen, P. V. (2012). Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD). *Atmospheric Environment*, 63, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.042>

2. LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN LA MODELACIÓN DE INSTALACIONES PECUARIAS: ESTADO DEL ARTE

Resumen

La producción animal en instalaciones es una actividad que se ha extendido a nivel mundial, motivada por una creciente demanda de productos de origen animal. La producción intensiva satisface los requerimientos de producción, sin embargo, en la sociedad moderna se exige garantizar el bienestar animal, por lo tanto, el diseño de las instalaciones pecuarias se convierte en un factor de gran importancia. Las instalaciones deben poder proveer al animal de las condiciones óptimas para su desarrollo. Conocer y controlar el comportamiento de las variables ambientales se vuelve una necesidad esencial para los productores y las herramientas para cumplir esa necesidad son variadas y muchas veces complejas. La dinámica de fluidos computacional (CFD), se ha venido consolidando como una de las principales técnicas en el estudio de la ventilación, temperatura, humedad, emisiones y transferencia de calor (animal-ambiente) en instalaciones pecuarias. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión de literatura del estado del arte de la modelación mediante la técnica CFD en el ámbito pecuario y mostrar los enfoques de esta técnica para diseñar, optimizar y controlar el ambiente de una instalación pecuaria. Se aborda principalmente dos enfoques: instalaciones con ventilación natural e instalaciones con ventilación mecánica. Queda demostrado a través de esta revisión que el CFD es una herramienta potente, que puede llegar a reducir costos y satisfacer las necesidades para el mejoramiento de la producción en instalaciones pecuarias.

Palabras clave: CFD, simulación, ambiente, ventilación.

2.1. Introducción

El mayor porcentaje de producción de carne a nivel mundial la suministran Asia, América Latina, el Caribe, América del Norte y África, siendo China el mayor contribuyente, seguido por Estados Unidos y Brasil, con 15.3, 6.0, y 4.5 millones de toneladas respectivamente, producción que de mayor a menor porcentaje está dada por carne aviar, porcina, bobina y ovina (OCDE-FAO, 2014). La leche bovina y los productos lácteos tienen una larga tradición en nutrición humana, tan solo el consumo de 0.5 litros de leche diariamente proporciona una cantidad

significativa de muchos de los nutrientes que se requieren diariamente (Haug, Høstmark, & Harstad, 2007). La carne de cerdo es un producto de gran valor como fuente de proteínas, minerales, grasas, entre otros (Araujo V., Rodríguez Arriola., Castillo, & Hincapié, 2018). La carne de conejo comparado con la carne de otros animales, tiene niveles más bajos de colesterol y altos niveles de proteínas con aminoácidos esenciales, en específico 4.4 veces más proteína por cada parte de grasa (Camps, 2000; Dalle Zotte & Szendrő, 2011; Olivares Pineda, Gómez Cruz, Schwentesius Rindermann, & Carrera Chávez, 2017). La carne de aves es una fuente importante de alimento para la dieta humana y tiene una alta tasa de consumo, no obstante el factor calidad cumple un rol especialmente importante (Fu & Chen, 2019).

En diversos productos comerciales, la calidad es un factor de gran importancia. En porcinos, la calidad de su carne depende principalmente y de igual medida de factores presentes en sus instalaciones, del transporte y procesado (Alarcón Rojo, Gamboa Alvarado, & Vidales Janacua, 2008). Las aves de corral sometidas a estrés térmico pueden sufrir altas tasas de mortalidad cuando la velocidad del aire en el microentorno alrededor de las aves cae por debajo de un nivel de umbral mínimo (Blanes-Vidal, Guijarro, Balasch, & Torres, 2008). A su vez, en muchas áreas de producción de pollos de engorda, se ve afectada cada año por varios episodios de mortalidad masiva de aves debido a la unión de valores altos de temperatura y humedad durante las temporadas de verano (Bustamante et al., 2013). Estos problemas causan grandes pérdidas económicas y sufrimiento animal, lo que es inconcebible en una sociedad moderna que utiliza una alta inversión tecnológica en estas granjas pecuarias y establece regulaciones para asegurar el bienestar animal (Bustamante et al., 2013). Por lo tanto, el control de parámetros climáticos como la temperatura, humedad, la velocidad del aire y los contaminantes del aire son esenciales para asegurar condiciones óptimas de producción y ambientes de trabajo saludables en instalaciones para animales (B. Bjerg, Svidt, Zhang, & Morsing, 2000; B. Bjerg, Svidt, Zhang, Morsing, & Johnsen, 2002). Además, científicos e ingenieros enfrentan el desafío de desarrollar

métodos para reducir el impacto ambiental, causado por la emisión de gases nocivos producidos por los animales, siendo responsable del 12% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Drewry, Choi, Powell, & Luck, 2018; Havlík et al., 2014). La evaluación precisa de la dinámica del clima interior de una instalación pecuaria, requiere avanzadas herramientas de modelación basados en computadoras (Rojano et al., 2019).

La ventilación se ha estudiado mediante diferentes métodos, entre otros, las técnicas de gas trazador se ha usado ampliamente para determinar la tasa de ventilación en diversos tipos de instalaciones (Sherman, 1990). La ecuación de orificio se aplica ampliamente para estimar la tasa de flujo de aire que ingresa a los establos con ventilación natural, sin embargo, al considerar el coeficiente de descarga de las aberturas como una constante, no es adecuado para grandes aberturas (Yi et al., 2018). CFD es una herramienta de modelado ampliamente utilizadas para este fin, porque incluye posibilidades potenciales para manejar todas las condiciones importantes que pueden influir en el entorno climático en un edificio pecuario (B. Bjerg et al., 2000). CFD es el análisis de sistemas en las que se ven involucradas el flujo de fluidos, la transferencia de calor y los fenómenos asociados con las reacciones químicas mediante simulación por computadora, donde es común simplificar los modelos, de lo contrario, la simulación puede volverse demasiado compleja para el modelado físico en las iteraciones (Ladeinde & Nearon, 1997; Li, Rong, & Zhang, 2018; Versteeg & Malalasekera, 2007). Mediante el uso de esta herramienta computacional, se han realizado una gran variedad de estudios relacionados al ámbito pecuario, desde trabajos para determinar el flujo de aire, transferencia de calor, emisiones, distribución de la temperatura y humedad, enfocados en instalaciones de cerdos, vacas, aves de corral y conejos (B. Bjerg et al., 2000; Bjarne Bjerg, Rong, & Zhang, 2018; Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Ojeda, & Ruíz-García, 2017; Poteko, Zähner, & Schrade, 2019; Rojano et al., 2016). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar una revisión de literatura sobre la modelación mediante la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional en el área pecuario,

así como también mostrar los enfoques de esta técnica para diseñar y optimizar el ambiente de una instalación pecuaria. El tema se aborda en orden cronológico de publicación y haciendo principalmente la distinción entre instalaciones con ventilación natural y ventilación mecánica.

2.2. Dinámica de fluidos computacional

La industria espacial fue pionera en el trabajo con técnicas CFD y que cada día resultan más comunes su aplicación en otras áreas, ahora el CFD se emplea regularmente para resolver los problemas ambientales en invernaderos e instalaciones de producción animal (Ballesteros, González, Fernandez, & Argüelles, 2003; Norton, Sun, Grant, Fallon, & Dodd, 2007).

Con el fin de proporcionar un fácil acceso a su poder de resolución, todos los paquetes CFD comerciales incluyen sofisticadas interfaces de usuario para introducir parámetros de problemas y examinar los resultados. Estos contienen tres elementos principales (Figura 1): un preprocesador, un solucionador (solver) y un postprocesador (Versteeg & Malalasekera, 2007). Entre los paquetes de CFD disponibles encontramos los comerciales como ANSYS (CFX, FLUENT), COMSOL, PHOENIX, STAR CCM+, etc., y los paquetes libres como OPEN FOAM, CFD2000, OpenFVM, etc. De estos paquetes destaca FLUENT y STAR CCM+ como los más populares, líderes y que dominan la industria CFD, por su parte OPEN FOAM es el programa libre más aceptado y ampliamente usado en la comunidad científica e industrial (Chandar, Boppana, & Kumar, 2018; McCleney, Green, & Owston, 2018; Yuan, Yan, Xu, & Karoutas, 2013; Zou, Zhao, & Chen, 2018). Estos paquetes proporcionan cuatro algoritmos para la resolución de las ecuaciones, tales como: SIMPLE, SIMPLEC, PISO y FSM, estos se conocen como algoritmos segregados basados en la presión. Para cálculos de estado estacionario generalmente se usa SIMPLE o SIMPLEC, mientras que PISO se recomienda para cálculos transitorios (ANSYS, 2010).

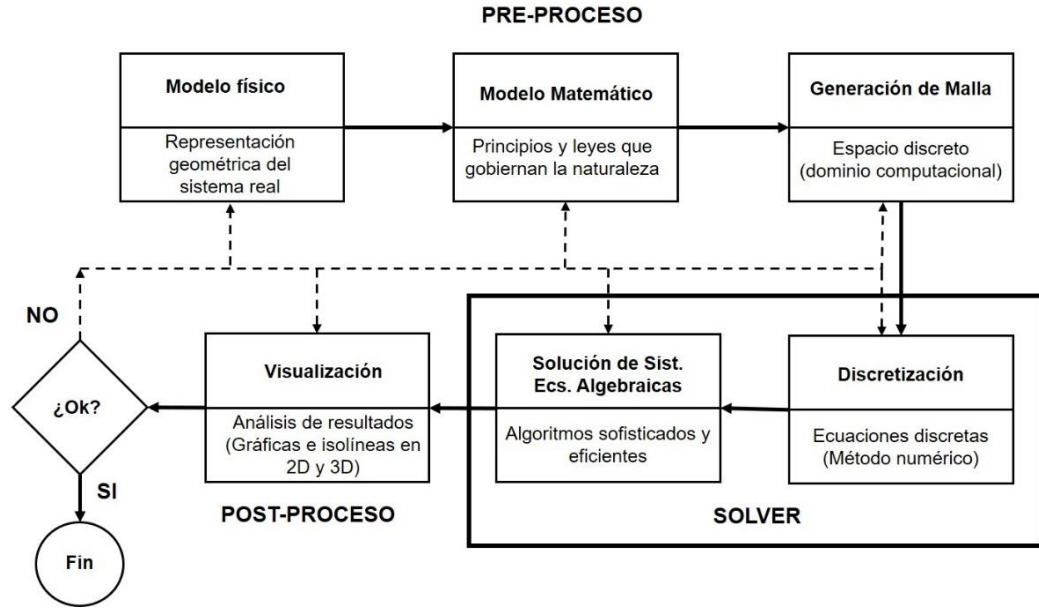


Figura 1. Elementos principales de un software CFD y sus características.

Las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos computacional de una forma u otra son ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, la continuidad, cantidad de movimiento y las ecuaciones de energía. A su vez estas son declaraciones matemáticas de tres principios fundamentales: conservación de la masa, segunda ley de Newton y conservación de la energía (Anderson, 2002). En resumen, la dinámica de fluidos computacional se rige por un grupo de ecuaciones en derivadas parciales conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, la cual se puede expresar de forma conservativa en la llamada ecuación de transporte y se muestra en la ecuación 1 (Versteeg et al., 2007).

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(\rho u\varphi) = \nabla(\nabla\Gamma\varphi) + S_{\varphi} \quad (1)$$

Donde: ∂ = derivada; ρ = densidad (kg m^{-3}); t = tiempo (s); ∇ = divergencia; φ = variable de estado (1, u , v , w , i , etc.); u = velocidad del fluido (m s^{-1}); Γ = coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y S = término fuente.

Para simular el flujo existen tres alternativas, simulación numérica directa (Direct Numerical Simulation, **DNS**), simulación de grandes escalas (Large Eddy

Simulation, **LES**) y ecuaciones promediadas o modelos de turbulencia (Reynolds Average Navier-Stokes Equations, **RANS**) (Vicente y Rodríguez & Salinas Vázquez, 2018). Sobre estas alternativas, André Bakker (2004) menciona que DNS resuelve para todas las escalas de flujos en movimiento, hasta la escala de Kolmogórov (en turbulencia es la escala más pequeña que puede existir sin que sea destruida por la viscosidad), LES resuelve para la mayoría de las escalas y modela los remolinos más pequeños, mientras que RANS solo resuelve los remolinos a gran escala y las restantes solo son modeladas (Figura 2).

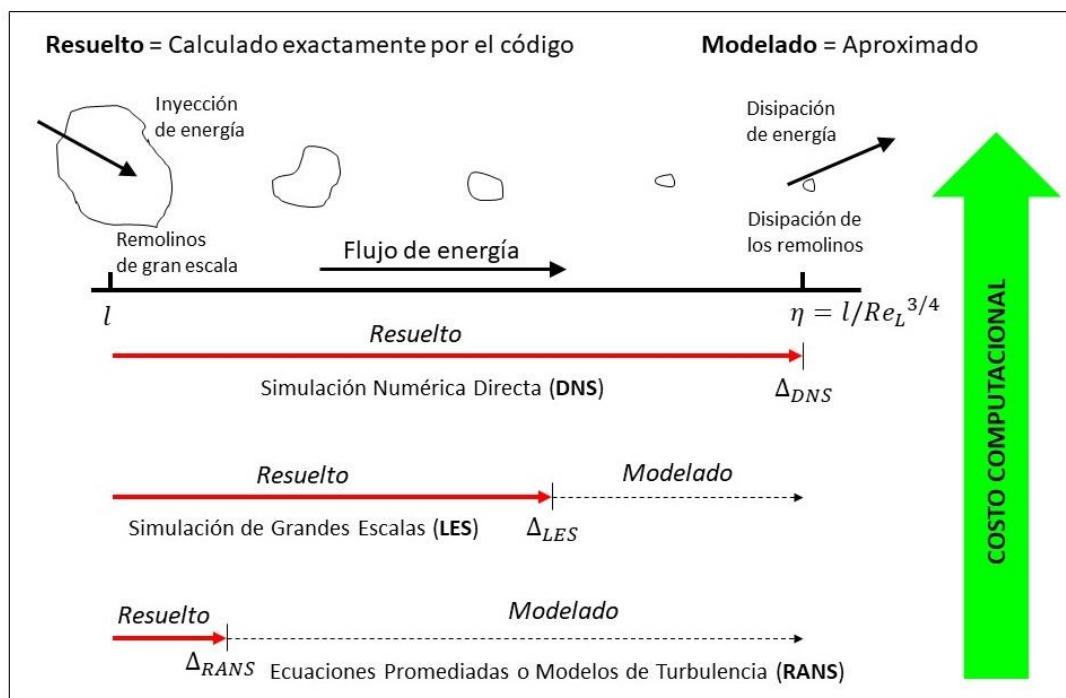


Figura 2. Escalas de transferencia de energía en modelado de turbulencia (DNS, LES y RANS) (Bakker, 2004).

Sobre los flujos turbulentos (RANS), estos se pueden calcular utilizando varios enfoques (Sodja & Podgornik, 2007). Estos modelos (Cuadro 1), son más eficientes computacionalmente, sin embargo no todos los modelos de turbulencia son adecuados para todos los tipos de flujo (Andre Bakker & Marden Marshall, 2016).

Cuadro 1. Modelos de turbulencia (RANS) y una breve descripción (ANSYS, 2010; Andre Bakker & Marden Marshall, 2016).

Modelo	Descripción
Spalart-Allmaras	Es un modelo que resuelve una ecuación de transporte para una variable similar a la viscosidad, desarrollado para flujos externos y con aplicación en el sector aeroespacial, es débil para turbulencia decreciente.
Standart k- ϵ	Es un modelo que proporciona una descripción general de la turbulencia por medio de dos ecuaciones de transporte, es el más utilizado, robusto, económico, de cálculo rápido, estable y resultados razonables para muchos flujos, especialmente aquellos con número de Reynolds altos, no se recomienda para flujos complejos.
RNG k- ϵ	Una versión modificada del modelo Standart k- ϵ , este produce resultados mejorados para flujos en remolino, pero no es tan estable.
Realizable k- ϵ	Otra versión del modelo Standart k- ϵ , el cual contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta y una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación. El término “realizable” significa que el modelo satisface ciertas restricciones matemáticas en las tensiones de Reynolds. Se caracteriza por resolver la anomalía del chorro redondo, que los anteriores modelos no lo hacen.
Reynolds Stress Model	El modelo completo de tensión de Reynolds proporciona buenas predicciones para todos los tipos de flujos, incluidos los remolinos, los de separación y los chorros redondos y planos. Debido a que resuelve las ecuaciones de transporte para las tensiones de Reynolds directamente, se requieren tiempos de cálculo más largos que para los modelos k- ϵ .

2.3. Modelación de instalaciones con ventilación natural

En instalaciones con ventilación natural, el ambiente interno está directamente influenciado por las condiciones de velocidad del viento externo y su naturaleza turbulenta, el efecto de flotabilidad y el diseño del edificio (Norton, Grant, Fallon, & Sun, 2009; Sapounas, Van Dooren, & Smits, 2013), donde es importante

estimar la tasa de ventilación con el fin de reducir las emisiones y proporcionar un clima interior adecuado (Yi et al., 2018).

Norton et al. (2009) desarrollaron un modelo CFD para investigar la ventilación natural de un edificio para animales, con diferentes incidencias del viento en tres diferentes áreas de apertura de las ventilas. En el estudio usaron un mallado no estructurado con elementos poliédricos, y el modelo turbulento $k-\epsilon$ en todas las simulaciones, las cuales se llevaron a cabo en el software comercial STAR-CCM+. La validación del modelo CFD lo realizaron usando un modelo a escala (1/2) de la estructura de un edificio ampliamente usado en Europa para construcciones pecuarias (Figura 3A), para dos condiciones de viento, la primera a dirección casi normal a las ventilas (con un desfase de 5°) y la segunda con un desfase de 75° . Ellos encontraron que las tasas de ventilación no eran las más adecuadas cuando el viento soplaba en dirección normal a las ventilas debido al diseño de la instalación que causaba una pérdida del flujo de aire, sin embargo, presentaba una mejor homogeneidad de la ventilación. Norton, Grant, Fallon y Sun (2010b), continuaron su investigación desarrollando modelos CFD para investigar la eficiencia de la ventilación y el ambiente térmico de una instalación para terneros, considerando materiales permeables en las ventilas. Los investigadores encontraron que ventilas con un revestimiento son mejores en términos de eficiencia de ventilación y confort térmico, ya que la resistencia que ofrece a la apertura de la ventila disminuye la pérdida de flujo de aire en dirección normal. Los estudios anteriores, proporcionaron información sobre las características de mezcla de aire durante la ventilación impulsada solamente por el viento y el efecto de la flotabilidad, y su relación cuando en las ventilas se hace uso de un material permeable al viento. Finalmente analizaron el efecto que tiene el tipo de revestimiento que se usa, la porosidad y su altura, donde encontraron que la porosidad influye mucho en la mezcla del aire interno y que un revestimiento con baja porosidad mejora significativamente la eficiencia de ventilación del edificio (Norton, Grant, Fallon, & Sun, 2010a). En otro estudio Norton, Grant, Fallon y Sun (2010d) llevaron a cabo una investigación enfocado

en conseguir la homogeneidad del ambiente térmico en la zona ocupada por los animales, para el cual utilizaron metodologías CFD para desarrollar modelos predictivos que describieran la homogeneidad del ambiente en función de la geometría y configuración de la ventilación de una instalación pecuaria, donde encontraron que modificaciones en la geometría del edificio tiene mayor efecto sobre la heterogeneidad ambiental cuando se emplea condiciones más restrictivas en las ventilas.

La eficiencia de la ventilación determinada mediante el concepto de edad del aire, término propuesto por Sandberg (1981), fue estudiada por Kwon et al. (2011), mediante técnicas CFD para superar las limitaciones experimentales al utilizar el método de gas trazador, para ello construyeron una cámara tridimensional para implementar y verificar con precisión la edad del aire a través de la simulación y el experimento en condiciones de estado inestable. Los resultados confirmaron la viabilidad de analizar la eficiencia de la ventilación en instalaciones agrícolas y pecuarias, mediante CFD a través del concepto de edad del aire. Mediante el sistema de ventilación se puede controlar la base del confort térmico, los contaminantes y el flujo de aire interno, al entender que controlar el estado ambiental interno es un factor clave para mejorar la productividad del ganado. Seo et al. (2012), realizaron un gran avance en el uso de CFD en el área pecuario, como lo mencionan, la mayoría de las simulaciones anteriores solo consideran en sus modelos las instalaciones como dominios tridimensionales simplificados, mientras que las configuraciones complicadas que incluyen animales se han ignorado en los modelos de simulación, lo anterior llevó a estos investigadores a modelar una instalación de cerdos comercial a gran escala para investigar los problemas de ventilación durante la temporada de frío (Figura 3B). Los resultados obtenidos por Seo et al. (2012), mostraron un error de -4.4% en comparación con los datos experimentales de campo, el modelo se usó para mejorar las condiciones ambientales internas de la instalación al cambiar las características de la ventilación, logrando mejorar en un 24% la uniformidad térmica.

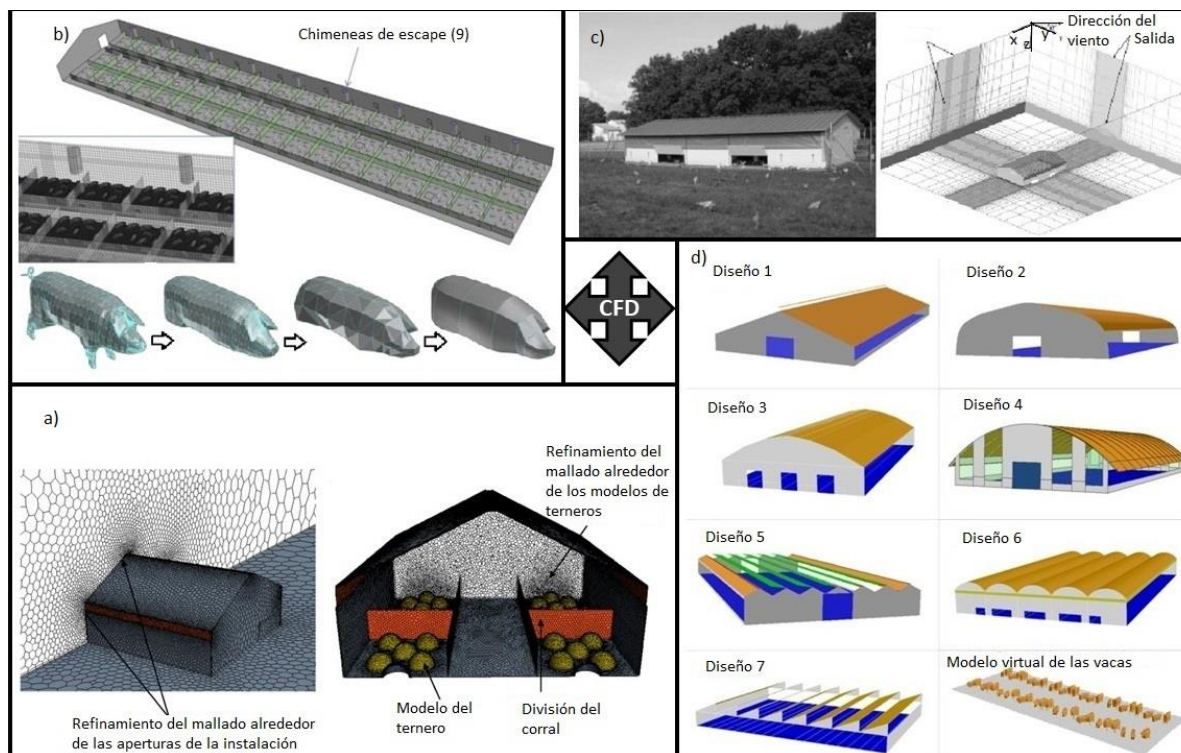


Figura 3. Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional en instalaciones pecuarias con ventilación natural. A) Modelo usado en los trabajos de Norton, Grant, Fallon, & Sun (2010c). B) Simulación CFD de un modelo que incluye la geometría del animal y modelo virtual simplificado de un cerdo (Bjarne Bjerg, Cascone, et al., 2013; Seo et al., 2012). C) Instalación avícola y dominio computacional (Rojano et al., 2016, 2019). D) Modelo de 7 instalaciones comerciales de vacas lecheras usados para simulación CFD (Sapounas et al., 2013).

Los edificios de ganado lechero son una fuente importante de emisiones de amoníaco y gases de efecto invernadero. Wu, Zhai, Zhang, y Nielsen (2012) afirman que la mayor incertidumbre en la estimación de emisiones de gases de una instalación con ventilación natural y grandes aperturas es la tasa de intercambio de aire. Wu et al. (2012) desarrollaron y validaron un modelo CFD para calcular la tasa de intercambio de aire, dentro del modelo incluyeron un submodelo, el cual usaron para derivar los coeficientes de resistencia de las vacas al flujo de aire, cabe mencionar que la zona ocupada por los animales fue tratada como un medio poroso. Sapounas et al. (2013) usaron un modelo de simulación 3D para simular 7 compartimientos comerciales de vacas lecheras con diferentes tipos de techo y ventilas laterales (Figura 3D), las simulaciones las

llevaron a cabo considerando diferentes velocidades del viento (1, 4 y 8 m/s), diferentes direcciones del viento (0, 10 y 90°) y diferentes temperaturas del aire exterior (0, 10 y 20 °C), usaron el método experimental de gas trazador para determinar la tasa de ventilación, mientras que la resistencia de las vacas al flujo de aire la calcularon simulando un túnel de viento virtual, considerando a los animales en el interior. Sapounas et al. (2013), encontraron que conocer la tasa de ventilación general de toda la instalación no proporciona suficiente información sobre las condiciones ambientales a nivel donde se encuentran los animales. En el año 2013 un grupo de investigadores llevaron a cabo una serie de revisiones sobre técnicas de modelado para estimar las emisiones de instalaciones pecuarias ventiladas naturalmente. La primera parte del estudio realizado por B. Bjerg et al. (2013), se centra en la modelación de emisiones de amoníaco. Estos autores afirman que los métodos CFD pueden proporcionar una oportunidad significativa para modelar condiciones ambientales distribuidas espacial y temporalmente alrededor de las superficies de liberación de amoníaco en edificios de ganado, sin embargo también afirman que para ese año, no se puede realizar la integración de CFD con los modelos al nivel del proceso de liberación de amoníaco, por falta de datos para validación y de la capacidad computacional necesaria para el procesamiento de los modelos 3D de CFD. La segunda parte de la revisión realizada por Liberati et al. (2013), se enfocó en mostrar lo antecedentes teóricos para el desarrollo de modelos de ventilación, mientras que la tercera parte de la revisión es para identificar las capacidades actuales (año 2013) de las técnicas de modelado de dinámica de fluidos computacional, y las áreas donde se requiere más investigación científica, y que tiene como fin identificar como se puede utilizar mejor el CFD en el futuro para diseñar instalaciones pecuarias ventiladas naturalmente y reducir las emisiones de amoníaco. Como conclusión de la tercera parte de la investigación Cascone et al. (2013), afirman que mediante modelos CFD se puede estudiar las emisiones de amoníaco, sin embargo es necesario avanzar en temas respecto a la calidad

y la confianza en los modelos de las instalaciones pecuaria con ventilación natural, tales como:

- 1.- Estrategias sobre como tomar la mejor decisión sobre la selección del modelo de turbulencia en relación con la aplicación de modelado en cuestión y las demandas computacionales,
- 2.- Desarrollos de enfoques estandarizados para la modelación del animal,
- 3.- Cuantificación del impacto del número de Schmidt en la dispersión de amoniaco,
- 4.- Desarrollo de modelos de irradiación solar más avanzados para comprender mejor su efecto sobre las emisiones de amoniaco,
- 5.- Desarrollo de un análisis de sensibilidad estandarizado de las incertidumbres involucradas en el modelo CFD,
- 6.- Desarrollo de enfoques estandarizados para la incorporación de la transferencia de contaminantes a través de las capas límites de las superficies emisoras en simulaciones a gran escala,
- 7.- Identificación de técnicas más efectivas de mallado.

La predicción de las emisiones de amoniaco y la velocidad del aire en establos para cerdos fue abordado por Li Rong, Bjerg y Zhang (2015), quienes evaluaron el modelado del suelo de rejilla como medio poroso en un establo a escala, con condiciones isotérmicas y concentración constante en la superficie de emisión. De este estudio, concluyeron que la escala de la geometría influye en los coeficientes de resistencia del modelado de medios porosos, y que el modelado de suelo de rejilla predice la velocidad del aire de manera adecuada en el área de la habitación y el área del fondo del suelo, mientras que mediante medio poroso no se puede predecir adecuadamente la velocidad del aire en áreas sobre el suelo, dando lugar a incertidumbres en la predicción de emisiones en graneros

a gran escala. Un estudio más completo sobre el coeficiente de transferencia de masa de amoníaco sobre dos tipos de suelos de rejillas en edificios de cerdos fue llevado a cabo por L. Rong y Aarnink (2019).

Rojano et al. (2015) desarrollo un modelo CFD bidimensional para evaluar la dinámica del calor latente, sensible, el transporte de masa y la transferencia de energía radiante en un edificio de pollos de engorda, el modelo pudo demostrar que para obtener mejor precisión en los cálculos y equilibrar adecuadamente el calor y la masa, deben ser considerados en el modelo elementos como la paja, subproductos generados por el calentador y sobre todo la presencia del animal. Para complementar el estudio anterior, Rojano et al. (2016) llevaron a cabo un nuevo modelo CFD esta vez en 3D, donde integraron los principales elementos que determinan el clima interno (generación de vapor de agua y calor animal, transferencia de calor por radiación y ventilación) de una granja avícola (Figura 3C), mediante el modelo lograron con éxito simular los procesos de calentamiento y enfriamiento en condiciones de operación típicas de las granjas avícolas, además estimaron mediante el modelo CFD la tasa de intercambio de aire y los intercambios de calor sensibles y latentes. Nuevamente, Rojano et al. (2019) propusieron una herramienta de modelado tridimensional que utiliza CFD, donde incluyeron el clima externo e interno, el calor sensible y latente emitido por las aves, mediante la simulación pudieron demostrar la confiabilidad del modelo el cual durante un periodo de tiempo factible, replicó la dinámica del clima interno observada en una granja avícola con ventilación natural y además las predicciones de descarga del aire fueron utilizadas para adaptar las ecuaciones de control del modelo PRIME-AERMOD.

El gradiente de temperatura y concentración de amoníaco en una instalación cunícula fue abordada por Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Ojeda, & Ruíz-García (2017), quienes realizaron simulaciones de un modelo CFD para dos diseños del sistema de ventilación. Para el modelo consideraron a las ventilas como un medio poroso, el espacio ocupado por las jaulas como un sólido y que

los animales se exponen a una tasa de emisión de amoníaco constante, como consecuencia un cambio en la tasa de ventilación no afecta la tasa de producción de amoníaco, siendo que esta depende de varias variables y no es constante. Además, encontraron que las tasas de ventilación aumentaron significativamente cuando la dirección del viento era normal a las ventilas, sin embargo, debajo de las jaulas la extracción de aire se vio limitada, concluyendo que una mayor tasa de ventilación no garantiza necesariamente una mayor homogeneidad en la instalación. En este mismo año se llevó a cabo un estudio donde se desarrolló una ecuación para la temperatura efectiva en las zonas de los corrales de cerdos y se realizaron simulaciones CFD para estimar los parámetros relevantes de esta ecuación, utilizaron el modelo estándar de turbulencia $k-\epsilon$, el método de solución SIMPLE y la zona ocupada por los animales como un medio poroso, debido a que modelar a los animales en el interior de la instalación presenta muchos desafíos relacionados con la cantidad de geometrías complejas requeridas y los sesgos relacionados con la asignación de una ubicación específica a cada animal (Bjarne Bjerg, Rong, & Zhang, 2018; Mondaca, Choi, & Cook, 2019).

2.4. Modelación de instalaciones con ventilación mecánica

Bjerg et al. (2000) evaluaron la técnica CFD como una herramienta para predecir el flujo de aire en salas de ganado, estudiaron la influencia de corrales con divisiones y la geometría del animal en una sala de pruebas. Encontraron que, en las mediciones y las simulaciones, la introducción de los corrales seccionados y los cerdos simulados, reducen las velocidades del aire en las zonas cercanas a estos, además afirman que la inclusión de la geometría del animal no es necesario en casos cuando los animales se ubican cerca de grandes obstáculos. En otra investigación, Bjerg et al. (2002) realizan un estudio sobre los diferentes métodos para modelar entradas de pared del flujo de aire, usaron el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ implementado en FLUENT. Los resultados en este estudio indican que suponer condiciones de entrada bidimensionales (2D) podría ser una forma útil de simplificar las condiciones de los límites de entrada y las construcciones

del mallado para la predicción del flujo de aire en instalaciones pecuarias con muchas entradas de pared, sin embargo, estas pruebas no fueron hechas en condiciones no-isotérmicas y no se probaron diferentes orientaciones y ubicaciones de las entradas, donde se podría obtener diferentes resultados.

Validar experimentalmente las simulaciones de CFD es importante, es así como Blanes-Vidal et al. (2008) plantean el objetivo de su investigación, donde desarrollaron cuatro simulaciones de flujos de aire dentro de un edificio para aves mediante el uso de diferentes condiciones de contorno y validaron las simulaciones CFD en base a las velocidades del aire. Ellos encontraron el mejor ajuste entre los datos experimentales y los simulados cuando se utilizaron como condiciones de frontera a la velocidad del aire como entradas y porcentaje de flujo de aire en las salidas. Por otra parte, Bustamante et al. (2013) analizaron un sistema de ventilación mecánico transversal, el cual se centra en la distribución de la velocidad del aire, utilizaron dinámica de fluido computacional y mediciones directas mediante un sistema de múltiples sensores para verificación y validación, y encontraron que no hay diferencia significativa en usar el sistema de múltiples sensores o las técnicas CFD para estudiar la velocidad del aire en el interior de la instalación. Sin embargo, en las zonas a nivel del animal si hay una pequeña diferencia, no obstante, se considera representativo para una situación real, similar a lo encontrado en otros estudios de instalaciones con ventilación mecánica como el de Blanes-Vidal et al. (2008). En el mismo sentido, Bustamante, Calvet, Estellés, Torres, & Hospitaler (2017) realizaron un estudio utilizando CFD y un sistema de múltiples sensores, con el objetivo de analizar científicamente el método de ventilación de un solo lado (entradas de aire y ventiladores ubicados en la misma pared lateral, muy usado en áreas mediterráneas), en instalaciones para pollos de engorda, concluyendo que existe heterogeneidad excesiva en el plano donde se encuentran los animales; y que el movimiento del aire es insuficiente para contribuir en la termorregulación de las aves, disminución del calor interno y estrés térmico asociado a periodos de clima cálido. Coradi, Martins, da Costa, Vigoderis y Tinôco (2016) utilizaron un modelo

CFD (con geometría de 3m x 6m, considerando una malla simétrica) para simular el aire caliente interno de un edificio para aves de corral, donde las condiciones de contorno fueron: 38 °C para la pared donde se encuentran las salidas de las tuberías de calefacción, los demás fueron consideradas aisladas, la simulación mostró que el sistema de calefacción no logró una distribución homogénea de temperatura, flujo de calor, presión de aire caliente y velocidad del aire.

En las instalaciones pecuarias, poco se ha estudiado sobre los mecanismos de generación de polvo, siendo que compromete la salud respiratoria de los animales y de los trabajadores, como lo define Seok Kwon, Lee y Ha (2016), quienes a través de un estudio encontraron que el número de animales y la ventilación fueron factores significativos en la generación de polvo inhalable, y la ventilación, la temperatura del aire interior y la actividad animal fueron factores significativos en la generación de polvo respirable. Así mismo, Kwon et al. (2016) utilizaron la dinámica de fluidos computacional para evaluar la eficiencia de reducción de polvo de un sistema conceptual de escape por tubos en un edificio para cerdos durante el suministro de alimentación, encontraron que el sistema usado mejoró claramente la calidad del aire interior, especialmente durante el periodo de suministro de alimentación. El estudio llevado a cabo por Li, Rong, Zong y Zhang (2017), en el que estimaron las velocidades del aire en la zona ocupada por los animales, con las entradas de aire en tres alturas diferentes de la instalación, a diferentes ángulos y tasas de flujo para una sala experimental de cerdos (Figura 4A), usaron la metodología de superficie de respuesta (RSM) y para la generación de datos experimentales llevaron a cabo simulaciones CFD con modelos de cerdos artificiales (Figura 4B). Posteriormente Li, Rong y Zhang (2017) aplicaron cinco modelos de turbulencia de uso común de dos ecuaciones a un modelo CFD para estudiar el flujo de aire de la instalación con ventilación mecánica y con la presencia del animal en el interior, además del efecto del mallado en subdominios computacionales (Figura 4A). Los resultados mostraron que la elección del modelo de turbulencia no tuvo efecto significativo en el patrón de flujo principal del aire, excepto el modelo de turbulencia RNG k- ϵ , y que el uso

de una malla tetraédrica no estructurada en el subdominio de la zona ocupada por los animales (ZOA) proporcionó resultados aceptables, concluyeron que una alternativa viable en el mallado de geometrías complejas son las mallas no conformables. Se reconoce que el aumento de la velocidad del aire local en la ZOA, es uno de los enfoques efectivos para disminuir el estrés por calor, no obstante, es esencial conocer la relación entre la pérdida de calor por convección y la velocidad del aire (Li et al., 2018). Es así como estudiar las pérdidas de calor por convección de modelos de cerdos mediante simulación numérica en condiciones semi-prácticas fue el objetivo del trabajo realizado por Li et al. (2018), donde probaron el coeficiente de transferencia de calor por convección (CTCC) en grupos de cerdos a diferentes velocidades y dos estilos de entrada del aire, y con modelos virtuales correspondientes a diferentes pesos corporales (30, 50 y 80 kg). Los resultados sobre los CTCC de los cerdos en grupo mostraron que estos estaban fuertemente correlacionados con las velocidades del aire de entrada, así como la con la velocidad del aire de referencia en la ZOA y que el peso de los modelos del cerdo no mostró efecto significativo, el CTCC fue aproximadamente un 60.4 % más alto en los corrales con entrada de aire hacia abajo (directamente a la ZOA) que en aquellos con entrada hacia arriba. El confort higrotérmico en granjas pecuarias es un factor importante para el crecimiento y salud de los animales, sobre todo en lechones destetados (K. Wang, Pan, & Li, 2017), por lo que para proporcionar una comprensión y evaluación fundamental de las mejoras del sistema de ventilación de una instalación de destete típica de la provincia de Zhejiang en China, K. Wang et al. (2017) realizaron simulaciones CFD para predecir velocidad del aire, temperatura y humedad relativa, concluyeron que los datos simulados son aceptables para temperatura y humedad relativa, y por lo tanto las técnicas CFD pueden ser aplicados para el estudio de este tipo de instalaciones y explotar las capacidades de esta herramienta.

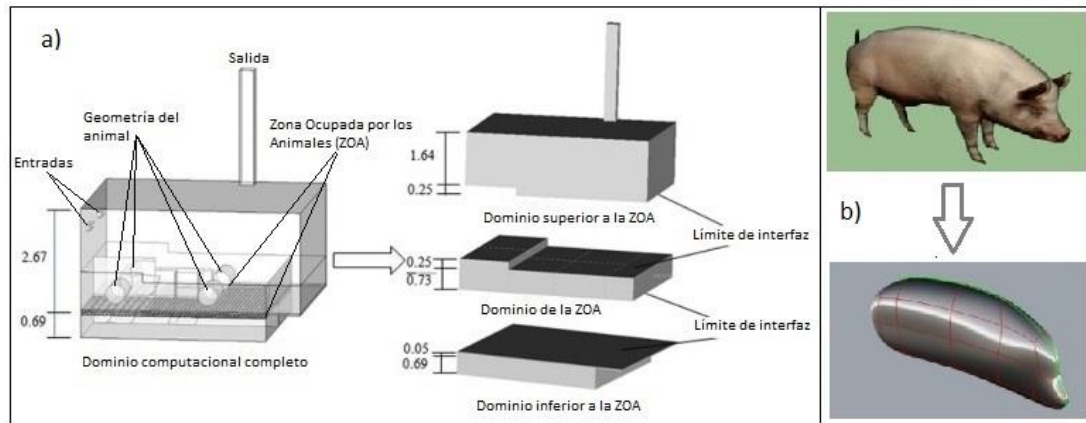


Figura 4. Geometrías de los trabajos de Hao Li. A) Edificio experimental de cerdos y divisiones del dominio computacional (dimensiones en metros). B) Modelo artificial de un cerdo (Li et al., 2018; Li, Rong, & Zhang, 2017).

Al igual que en instalaciones con ventilación natural, estudios para simular la generación y dispersión de gases como el metano y amoníaco se han llevado a cabo en ventilación mecánica. Drewry et al. (2018) llevaron a cabo simulaciones de dinámica de fluidos computacional para la generación de metano, amoníaco, y calor, además de su transporte dentro del dominio de una cámara experimental para una vaca. Para demostrar los efectos potenciales de las fuerzas de flotabilidad y la distribución térmica, realizaron una simulación bidimensional de una sección transversal de la cámara experimental. La simulación tridimensional se llevó a cabo para casos cuando la vaca se encontraba echada y de pie, con y sin consideración del efecto de flotabilidad. Drewry et al. (2018) concluyen que las representaciones de las simulaciones son momentos discretos en el tiempo y no pueden explicar los patrones temporales de movimiento del animal y la generación de gas que ocurren en el espacio de estudio, sin embargo, los resultados indican que las geometrías simplificadas de animales como el modelo usado de seis cilindros, pueden proporcionar aproximaciones razonables del transporte de masa y calor.

Entre los estudios más recientes se encuentran los llevados a cabo por Fidaros, Baxevanou, Bartzanas y Kittas (2018), donde simularon la ventilación de cámara de pollos totalmente automatizada, equipada con ventiladores y paneles

evaporativos, y Tong, Hong y Zhao (2019) quienes estudiaron mediante simulaciones CFD las distribuciones espaciales del patrón de flujo de aire, el entorno térmico y la concentración de amoníaco (NH_3) en una casa comercial de aves modificadas con una capa de estiércol en foso profundo de gran altura con un sistema de ventilación mixto bajo condiciones climáticas cálidas, suaves y frías, obteniendo buena concordancia entre los datos del modelo y las mediciones de campo para las concentraciones de NH_3 , velocidades del aire y condiciones térmicas del ambiente.

2.5. Modelaciones pecuarias que no incluyen una instalación

En esta sección se hará referencia a aquellos estudios realizados sobre la interacción del animal y su ambiente inmediato, sin involucrar completamente como dominio a la instalación pecuaria.

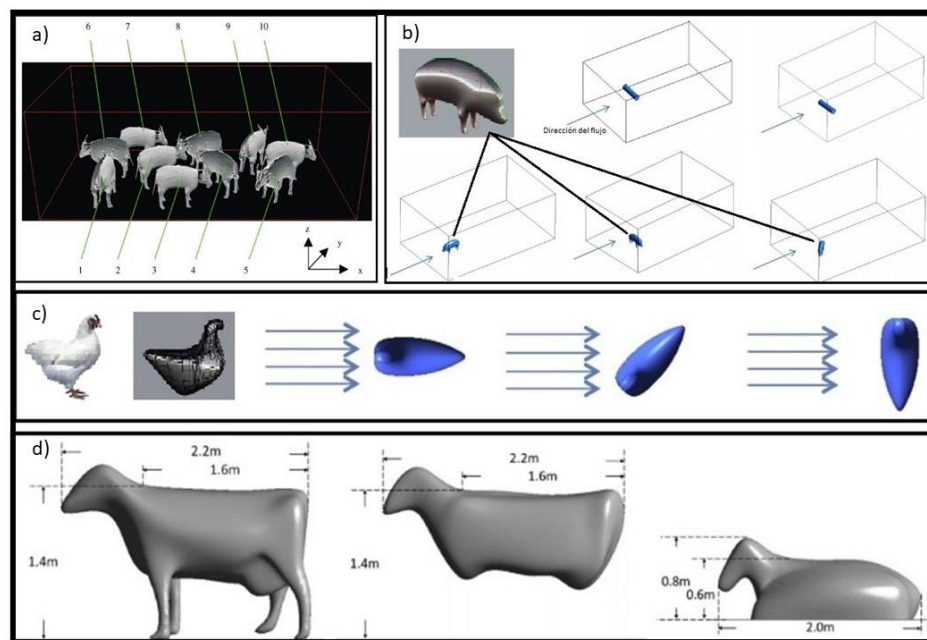


Figura 5. Geometría de los animales usados en simulaciones CFD. A) Dominio computacional y modelo virtual de 10 vacas (Gebremedhin & Wu, 2003). B) Modelo de cerdo a tamaño real y flujo a diferentes orientaciones del animal en el dominio computacional (Li, Rong, & Zhang, 2016). C) Modelo de ave doméstica y flujo de aire a diferentes orientaciones (Li, Rong, Zong, et al., 2016). D) Modelo virtual de una vaca en diferentes posiciones; parada y con extremidades, parada sin extremidades, y reclinada (Wang et al., 2018).

Entre los más destacados se encuentran aquellos sobre transferencia de calor por convección entre el animal y su entorno, mediante CFD (Figura 5). Gebremedhin y Wu (2003) realizaron simulaciones de intercambio de calor de 10 vacas y su entorno (Figura 5A), utilizaron el modelo RNG k- ϵ basado en los resultados de convergencia y estabilidad computacional al evaluar 5 modelos de turbulencia. En cerdos, Li, Rong y Zhang (2016), se plantearon como objetivo evaluar el impacto de la velocidad del flujo de aire, la intensidad de la turbulencia y la orientación animal en la transferencia de calor por convección (Figura 5B), en las simulaciones en un túnel de viento virtual usaron dos modelos de geometría (cerdo con tamaño real y modelo cilíndrico simplificado), los resultados encontrados sobre el CTCC del cerdo, mostraron que existe una correlación entre ambas geometrías usadas en la simulación, y que el coeficiente se ve afectado significativamente por la orientación y la intensidad de la turbulencia. Li, Rong, Zong y Zhang (2016) llevaron a cabo una simulación preliminar con el modelo SST k- ω y un modelo esférico de un pollo, el cual compararon con una ecuación semi-experimental. Encontraron buena concordancia y por lo tanto adoptaron el método numérico para seguir modelando con una geometría más realista de un pollo, a tres ángulos diferentes entre el eje del tronco del pollo y la dirección del flujo de aire (Figura 5C). Los resultados que obtuvieron, revelaron que el ángulo con el que el flujo de aire golpea al modelo del pollo no fue significativo, mientras que, al aumentar el tamaño del modelo equivalente a diferentes pesos del ave, el CTCC aumento conforme se aumentó la superficie del modelo. Un resultado sustancial fue que, al existir una correlación entre el CTCC entre una esfera y el modelo más realista del pollo, concluyeron que el modelo geométrico de un pollo puede simplificarse a una esfera en estudios futuros. Wang, Zhang y Choi (2018) aplicaron un modelo de turbulencia de transporte de esfuerzo cortante (SST k- ω), para simular y analizar la transferencia de calor asociada con una vaca típica en dos diferentes posiciones del animal (Figura 5D). Concluyeron que el modelo SST k- ω , es adecuado para predecir la cantidad de calor que se transferirá de la superficie de la vaca a través de la convección, que la velocidad del flujo de aire

afecta significativamente la tasa de transferencia de calor por convección, y que la postura del animal afecta el CTCC, se tiene que el coeficiente es mayor para una vaca reclinada que estando de pie en un flujo de aire horizontal, mientras que es 26.4 % mayor para una vaca estando de pie que reclinada en un flujo de aire hacia abajo, no obstante la tasa de disipación de calor es mayor para una vaca que esta parada a una que se encuentre reclinada.

2.6. Conclusiones.

La revisión de literatura mostró que se han realizado una gran cantidad de estudios sobre la determinación de la tasa de ventilación en diferentes tipos de instalaciones pecuarias, dedicadas a la producción de diferentes tipos y productos animales, mostrando así la importancia que tiene el sistema de ventilación en el manejo y control de las variables ambientales, como: la temperatura, humedad, el coeficiente de transferencia de calor por convección y las concentraciones de las emisiones.

Se ha encontrado mayor aplicación de las técnicas de simulación mediante dinámica de fluidos computacional en instalaciones dedicadas a cerdos, vacas y pollos, mientras que, en conejos, ocas, ovejas, etc., estos son escasos. Por lo tanto, el área de estudio aún es amplio y queda mucho que estudiar.

La mayoría de los estudios revisados utilizan la simulación numérica basada en el método RANS, lo cual implica que las simulaciones no sean las más precisas en comparación a utilizar métodos como LES o DNS, sin embargo, los recursos computacionales requeridos es lo que limita la implementación de estos métodos, siendo de esta manera más viable el uso de RANS.

La dinámica de fluidos computacional ha llegado a convertirse en una herramienta apta para simular el comportamiento de los parámetros ambientales de una instalación pecuaria, no obstante, aún con el avance tecnológico moderno el proceso de validación de los modelos utilizados en CFD es esencial para lograr mejores resultados y mayor aceptabilidad en la comunidad científica.

2.7. Literatura citada.

- Alarcón, A. D., Gamboa, J. G., & Vidales, H. (2008). Factores que afectan la calidad de carne de cerdo. *Nacameh*, 2(1), 63–77. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3987340>
- Anderson, J. D. (2002). Computational fluid dynamics: the basics with applications. *Chemie Ingenieur Technik*, 206. <https://doi.org/10.1002/cite.200303306>
- ANSYS. (2010). ANSYS FLUENT User's Guide-13.2.1. Reynolds averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence models. ANSYS Inc., 15317. Recuperado de <http://www.ansys.com>
- Araujo V., P. A., Rodríguez Arriola., J. D., Castillo, R., & Hincapié, J. (2018). Efecto del uso de avilomicina en el desempeño de cerdos de engorde. *Escuela Agrícola Panamericana Zamorano*. Recuperado de <http://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/6327>
- Bakker, André. (2004). Modeling turbulence in stirred vessels: a review and recent developments. *Computational Technologies for Fluid, Thermal, Structural and Chemical Systems With Industrial Applications*, 1, 161–161. <https://doi.org/10.1115/PVP2004-3102>
- Bakker, Andre, & Marden Marshall, E. (2016). Computational fluid dynamics (Pre-Print). *Encyclopedia of Chemical Processing*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32547.25125>
- Ballesteros, R., González, J., Fernandez, J. M., & Argüelles, K. M. (2003). Técnicas numéricas en mecánica de fluidos. *Universidad de Oviedo*.
- Bjerg, B., Norton, T., Banhazi, T., Zhang, G., Bartzanas, T., Liberati, P., et al. (2013). Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 1: Ammonia release modelling. *Biosystems Engineering*, 116(3), 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.08.001>
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., & Morsing, S. (2000). The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(3), 317–326. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0596>
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., Morsing, S., & Johnsen, J. O. (2002). Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34(1–3), 223–235. [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00189-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00189-2)
- Bjerg, B., Cascone, G., Lee, I. B., Bartzanas, T., Norton, T., Hong, S. W., et al. (2013). Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 3: CFD modelling. *Biosystems Engineering*, 116(3), 259–275. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.06.012>

- Bjerg, B., Liberati, P., Marucci, A., Zhang, G., Banhazi, T., Bartzanas, T., et al. (2013). Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings: Part 2, air change modelling. *Biosystems Engineering*, 116(3), 246–258. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.010>
- Bjerg, B., Rong, L., & Zhang, G. (2018). Computational prediction of the effective temperature in the lying area of pig pens. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.016>
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S., & Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*, 100(1), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.004>
- Bustamante, E., Calvet, S., Estellés, F., Torres, A. G., & Hospitaler, A. (2017). Measurement and numerical simulation of single-sided mechanical ventilation in broiler houses. *Biosystems Engineering*, 160, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.05.009>
- Bustamante, E., García-Diego, F. J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A., et al. (2013). Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. *Energies*, 6(5), 2605–2623. <https://doi.org/10.3390/en6052605>
- Camps, J. (2000). Beneficios de las características nutricionales de la carne de conejo para la salud humana. *Cunicultura*, 25(146), 188–192. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/20542663.pdf>
- Chandar, D. D., Boppana, B., & Kumar, V. (2018). A comparative study of different overset grid solvers between OpenFOAM, StarCCM+ and Ansys-Fluent. *AIAA Aerospace Sciences Meeting*. <https://doi.org/10.2514/6.2018-1564>
- Coradi, P. C., Martins, M. A., da Costa, D. R., Vigoderis, R. B., & Tinôco, I. F. F. (2016). Computational fluid dynamics (CFD) simulating heated air from wood burning inside a poultries barn. *Engenharia Agrícola*, 36(5), 768–778. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n5p768-778/2016>
- Dalle Zotte, A., & Szendrő, Z. (2011). The role of rabbit meat as functional food. *Meat Science*, 88(3), 319–331. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2011.02.017>
- Drewry, J. L., Choi, C. Y., Powell, J. M., & Luck, B. D. (2018). Computational model of methane and ammonia emissions from dairy barns: Development and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.012>
- Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Numerical study of mechanically ventilated broiler house equipped with evaporative pads. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.016>

- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Ojeda, W., & Ruíz-García, A. (2017). Thermal and ammonia concentration gradients in a rabbit barn with two ventilation system designs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 134–140. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p134-140>
- Fu, X., & Chen, J. (2019). A review of hyperspectral imaging for chicken meat safety and quality evaluation: application, hardware, and software. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(2), 535–547. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12428>
- Gebremedhin, K. G., & Wu, B. X. (2003). Characterization of flow field in a ventilated space and simulation of heat exchange between cows and their environment. *Journal of Thermal Biology*, 28(4), 301–319. [https://doi.org/10.1016/S0306-4565\(03\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0306-4565(03)00007-X)
- Haug, A., Høstmark, A. T., & Harstad, O. M. (2007). Bovine milk in human nutrition – a review. *Lipids in Health and Disease*, 6(1), 25. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-6-25>
- Havlík, P., Valin, H., Herrero, M., Obersteiner, M., Schmid, E., Rufino, M. C., et al. (2014). Climate change mitigation through livestock system transitions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(10), 3709–3714. <https://doi.org/10.1073/pnas.1308044111>
- Kwon, K. S., Lee, I. B., Han, H. T., Shin, C. Y., Hwang, H. S., Hong, S. W., et al. (2011). Analysing ventilation efficiency in a test chamber using age-of-air concept and CFD technology. *Biosystems Engineering*, 110(4), 421–433. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.08.013>
- Kwon, K. S., Lee, I. B., & Han, H. T. (2016). Identification of key factors for dust generation in a nursery pig house and evaluation of dust reduction efficiency using a CFD technique. *Biosystems Engineering*, 151, 28–52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.020>
- Ladeinde, F., & Nearon, M. D. (1997). CFD applications in the HVAC&R industry. *ASHRAE Journal*, 39(1), 44–48.
- Li, H., Rong, L., & Zhang, G. (2016). Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 123, 203–210. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.02.027>
- Li, H., Rong, L., & Zhang, G. (2017). Reliability of turbulence models and mesh types for CFD simulations of a mechanically ventilated pig house containing animals. *Biosystems Engineering*, 161, 37–52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.012>
- Li, H., Rong, L., & Zhang, G. (2018). Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.013>

- Li, H., Rong, L., Zong, C., & Zhang, G. (2016). A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. *Biosystems Engineering*, 150, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.005>
- Li, H., Rong, L., Zong, C., & Zhang, G. (2017). Assessing response surface methodology for modelling air distribution in an experimental pig room to improve air inlet design based on computational fluid dynamics. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.009>
- McCleney, A. B., Green, S. T., & Owston, R. A. (2018). Validation of multiphase modeling of a horizontal liquid-liquid separator in Fluent and STAR-CCM+. *Offshore Technology Conference*. <https://doi.org/10.4043/28763-ms>
- Mondaca, M. R., Choi, C. Y., & Cook, N. B. (2019). Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation. *Biosystems Engineering*, 183, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.014>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2009). Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 103(1), 78–99. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.007>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2010a). A computational fluid dynamics study of air mixing in a naturally ventilated livestock building with different porous eave opening conditions. *Biosystems Engineering*, 106(2), 125–137. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.02.006>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2010b). Assessing the ventilation performance of a naturally ventilated livestock building with different eave opening conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 71(1), 7–21. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.11.003>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2010c). Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(1), 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.04.002>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2010d). Optimising the ventilation configuration of naturally ventilated livestock buildings for improved indoor environmental homogeneity. *Building and Environment*, 45(4), 983–995. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.10.005>
- Norton, T., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R., & Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12), 2386–2414. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.11.025>

- OCDE-FAO. (2014). Mercado de ganados y carnes, proyecciones 2023. 1–31. Recuperado de <http://www.agroindustria.gob.ar>
- Olivares, R., Gómez, M. Á., Schwentesius, R., & Carrera, B. (2017). Alternativas a la producción y mercadeo para la carne de conejo en Tlaxcala, México. *Región Y Sociedad*, 21(46). <https://doi.org/10.22198/rys.2009.46.a482>
- Poteko, J., Zähler, M., & Schrader, S. (2019). Effects of housing system, floor type and temperature on ammonia and methane emissions from dairy farming: A meta-analysis. *Biosystems Engineering*, 182, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.03.012>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 136(0), 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.05.004>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2016). Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house. *Biosystems Engineering*, 151, 273–285. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.012>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2019). Modelling the impact of air discharges caused by natural ventilation in a poultry house. *Biosystems Engineering*, 180(2013), 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.001>
- Rong, L., & Aarnink, A. J. A. (2019). Development of ammonia mass transfer coefficient models for the atmosphere above two types of the slatted floors in a pig house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 183, 13–25. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.04.011>
- Rong, L., Bjerg, B., & Zhang, G. (2015). Assessment of modeling slatted floor as porous medium for prediction of ammonia emissions - Scaled pig barns. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.007>
- Sandberg, M. (1981). What is ventilation efficiency? *Building and Environment*, 16(2), 123–135. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(81\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0360-1323(81)90028-7)
- Sapounas, A. A., Van Dooren, H. J. C., & Smits, M. C. J. (2013). Natural ventilation of commercial dairy cow houses: Simulating the effect of roof shape using CFD. *Acta Horticulturae*, 1008, 221–228. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1008.29>
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Hong, S. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P., et al. (2012). Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals. *Biosystems Engineering*, 111(1), 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.10.012>

- Sherman, M. H. (1990). Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. *Building and Environment*, 25(4), 365–374.
[https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90010-O](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90010-O)
- Sodja, J., & Podgornik, R. (2007). Turbulence models in CFD. *University of Ljubljana*, 1–18. Recuperado de http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2006_2007/Turbulence_models_in_CFD.pdf
- Tong, X., Hong, S. W., & Zhao, L. (2019). CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 281–299.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.031>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. *Pearson Education Ltd*.
- Vicente, W., & Salinas, M. (2018). Dinámica de fluidos computacional para el análisis de sistemas de interés práctico que incluye el movimiento de fluidos. *Gaceta Instituto de Ingeniería, UNAM*, 1, 6–8. Recuperado de <http://gacetaii.iingen.unam.mx/GacetaII/index.php/gii/article/view/2441/2350>
- Wang, K., Pan, Q., & Li, K. (2017). Computational fluid dynamics simulation of the hygrothermal conditions in a weaner house in eastern China. *Transactions of the ASABE*, 60(1), 195–205. <https://doi.org/10.13031/trans.11655>
- Wang, X., Zhang, G., & Choi, C. Y. (2018). Effect of airflow speed and direction on convective heat transfer of standing and reclining cows. *Biosystems Engineering*, 167, 87–98.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.011>
- Wu, W., Zhai, J., Zhang, G., & Nielsen, P. V. (2012). Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD). *Atmospheric Environment*, 63, 179–188.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.042>
- Yi, Q., Zhang, G., König, M., Janke, D., Hempel, S., & Amon, T. (2018). Investigation of discharge coefficient for wind-driven naturally ventilated dairy barns. *Energy and Buildings*, 165, 132–140.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.038>
- Yuan, P., Yan, J., Xu, Y., & Karoutas, Z. (2013). Comparison between CFD analysis and experimental data for flow in a 5 × 5 rod bundle with spacer-grids. *Transactions*, 109(1), 1605–1608.
- Zou, Y., Zhao, X., & Chen, Q. (2018). Comparison of STAR-CCM+ and ANSYS Fluent for simulating indoor airflows. *Building Simulation*, 11(1), 165–174.
<https://doi.org/10.1007/s12273-017-0378-8>

3. SISTEMA DE MONITOREO DE TEMPERATURA, HUMEDAD Y AMONIACO BASADO EN ARDUINO APLICADO A UNA INSTALACIÓN CUNÍCOLA

Resumen

Los variables ambientales (temperatura, humedad y concentración de amoniaco), son de gran importancia en instalaciones dedicadas a la producción cunícola, y conocer el comportamiento es esencial. En este estudio se desarrolló un sistema de monitoreo basado en Arduino para medición y registro de la temperatura, humedad y concentración de amoniaco en una instalación cunícola. Se diseñaron y construyeron placas de circuito impreso para el microcontrolador Arduino y los componentes del sistema (módulo de tiempo real (RTC) y microSD) y un grupo de placas auxiliares para los sensores. Se realizó la instalación del sistema de monitoreo en un módulo cunícola y se obtuvieron los datos de las variables ambientales por un periodo de 2 semanas.

Palabras clave: Ambiente, Arduino, Circuito, Microcontrolador, Monitoreo.

3.1. Introducción

Los parámetros ambientales y su comportamiento dentro de una instalación dedicada a la producción cunícola, son de gran importancia, la temperatura y humedad son los parámetros de mayor relevancia, debido a los efectos causados a los animales cuando estas variables se encuentran fuera de la zona de confort térmico (ZCT), los animales de granja según NRC (1981), citado por El-Tohamy, Kotp y Mohamed (2012), tienen zonas de confort que dependen principalmente de la especie y de su estado fisiológico, del grado de radiación solar, humedad relativa y velocidad del aire en el ambiente.

La temperatura ambiental efectiva por debajo de la temperatura crítica (por debajo de la ZCT) constituye al estrés por frío y por encima de la ZCT al estrés por calor (Ames, 1980). Sobre el estrés por calor Morrison (1983), afirma que además de la temperatura alta, esta puede ser intensificada por la alta humedad, radiación térmica y bajo movimiento del aire. La velocidad del aire en el ambiente toma mayor importancia en instalaciones con ventilación natural debido a que las

condiciones climáticas que rodean al edificio son los factores principales que determinan la tasa de ventilación y muy probablemente también en la tasa de emisión de gases (Ngwabie, Jeppsson, Nimmermark, Swensson, & Gustafsson, 2009). De los gases presentes en el ambiente de la instalación el amoníaco (NH_3) es producido de la degradación de la orina y excremento del conejo (Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Ojeda, & Ruíz-García, 2017). La exposición a altas concentraciones de amoníaco provoca disminución en la frecuencia respiratoria de los conejos (Mayan & Merilan, 1972).

Conocer la temperatura, humedad y concentración de amoníaco dentro de la instalación cunícula se vuelve importante para mantener dentro de la ZCT a los animales, investigaciones sobre este tema se han llevado a cabo desde 1953 (Ni et al., 2009), los investigadores han usado diferentes métodos de recolección de datos haciendo usos de equipos y sensores que facilitan esta tarea. Existen data logger comerciales muchas veces no coinciden con el tipo de sensores que se usan, presentan problemas con respecto a la precisión, la cantidad insuficiente de canales de entrada o los canales de entrada inadecuados para la conexión de sensores específicos, como en el caso de los termopares o digitales (Fuentes, Vivar, Burgos, Aguilera, & Vacas, 2014), razón principal para muchos autores de utilizar plataformas de código abierto como lo es Arduino, este sistema es de bajo costo y altamente escalable en términos de tipos de sensores y la cantidad de nodos de sensores, lo que lo hace adecuado para una amplia variedad de aplicaciones relacionadas con el monitoreo ambiental (Ferdoush & Li, 2014). Respecto a este tipo de aplicaciones Tincopa, Baltuano, & Bedregal (2015) presentan el desarrollo de una red inalámbrica de bajo costo, para el registro automático de los parámetros de temperatura y humedad ambiental haciendo uso de un microcontrolador presente en Arduino y un sensor DHT22 de temperatura y humedad, Barraza et al. (2017) usaron este sensor para monitoreo en apicultura, mientras que Marinelli y Urquijo (2017) lo utilizaron para el control de una cámara de germinación hidropónico, para el amoníaco existen sensores comerciales basados en óxidos de metal semiconductores utilizados en

investigaciones en granjas avícolas y monitoreo de contaminantes ambientales por Corzo-Ruiz y Suárez (2007); Heriawan, Suciati y Supriyanto (2013); Dhas y Jeyanthi (2017); Yang y Liu (2013).

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un sistema de monitoreo con sensores mediante Arduino para medición y registro de temperatura, humedad y concentración de amoniaco en una instalación cunícola.

3.2. Materiales y métodos.

3.2.1 Descripción del sistema

El sistema desarrollado para medir y registrar las variables ambientales está constituido de un circuito principal y de un arreglo de sensores. El circuito principal se basa en un microcontrolador programable (Arduino Nano), el cual se comunica con los sensores MQ-137 para amoniaco y DHT22 para temperatura y humedad (Cuadro 1).

Cuadro 1. Datos técnicos de los sensores de amoniaco, temperatura y humedad utilizados en el sistema desarrollado para el monitoreo de una instalación cunícola.

Sensor	Característica	
DHT22	Voltaje de alimentación	3.3 – 5.5 V
	Humedad	0 – 100 RH
	Temperatura	-40 °C a 80 °C
	Precisión	+/- 2 % RH +/- 0.5 °C
	Tiempo de muestreo	2 s
MQ-137	Voltaje de alimentación	5 +0.1 V
	Concentración NH ₃	5 – 500 ppm
	Tiempo de muestreo	≈ 3 s
	Tiempo de precalentamiento	+ 24 hrs

3.2.2. Diseño del circuito

Los componentes principales del circuito son una placa de desarrollo Arduino Nano, un módulo de tiempo real (RTC) DS1302, un módulo lector de memorias

micro SD, fuente de alimentación de 9 V y sensores (DHT22 y MQ-137). La lista completa de los componentes se puede observar en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Componentes utilizados en el diseño y desarrollo del circuito para medición de variables ambientales de una instalación cunícola.

Componente	Modelo	Fabricante
Microcontrolador	Arduino	Mouser Electronics
Módulo de tiempo real (RTC)	Nano	Maxim Integrated™
Módulo lector de memoria micro SD	DS1302	CDMX Electrónica (Vendedor)
Fuente de alimentación	9 volts	Phillips
Sensor de temperatura y humedad (DHT22)	AM2302	Aosong (Guangzhou) ElectronicsCo., Ltd
Sensor de amoniaco	MQ-137	XNQ Electric Company

Arduino Nano: Es una plataforma que incorpora un microcontrolador simple y un entorno de desarrollo basada en el ATmega328, muy utilizada a nivel mundial para crear aplicaciones y proyectos en electrónica y robótica (Plaza, Sancristobal, Fernandez, Castro, & Perez, 2016). Esta versión de Arduino se caracteriza por tener 14 pines digitales que pueden ser usados como entrada o salida, funcionan a 5 V y proporcionan un máximo de 40 mA, además de 8 pines analógicos que proporcionan 10 bits de resolución, es decir, 1024 valores diferentes. Los pines utilizados se pueden observar en la Figura 1b.

RTC DS1302: Es un módulo reloj y calendario, cuya función principal es la de mantener actualizada la fecha y hora del sistema en posibles pérdidas de energía en el microcontrolador, y actuar como coordinador de las acciones de censado y almacenaje de los datos (Hurtado, Camilo, Murillo, Andrés, & Salazar, 2016; Koo, May, Pacho, May, & García, 2018; Moreno-Illorca, 2013).

Lector microSD: Este módulo brinda el mejor rendimiento cuando se conecta a los pines SPI de un microcontrolador, realizando la transferencia de datos mucho más rápido (Adafruit Industries, 2019). El módulo lector microSD Arduino tiene la principal función de valer como interface entre la placa Arduino y la memoria SD (Marín Mamani, Lozada Vilca, Huamán Carreon, & Bolaños Calderón, 2018).

DHT22: Es un sensor de humedad y temperatura que usa un protocolo de comunicación serial propio, utiliza sólo una conexión en uno de sus pines, por esta razón se debe hacer uso de la información técnica del fabricante para una buena comunicación (Electronilab, 2016), sin embargo, ya se han desarrollado librerías de Arduino que ofrecen funciones de comunicación tales como las que se encuentran a disposición en los sitios web de Adafruit, GitHub y Arduino.

MQ-137: Los sensores de la familia MQ, son sensores semiconductores de óxido metálico (Kiani, Minaei, & Ghasemi-Varnamkhasti, 2016; Sudarmaji, Gunawan, Hilyana, & Fernando, 2018; Yang & Liu, 2013). Las reacciones en la superficie del óxido metálico cambia la conductividad de la capa de detección, que puede leerse eléctricamente para obtener una señal proporcional a la concentración del gas objetivo (Sergi Udina, 2012). El MQ-137 utiliza óxido de estaño (SnO_2) como material sensible, el cual ofrece baja conductividad en aire limpio, mientras que en presencia de Amoniaco la conductividad del sensor aumenta conforme aumenta la concentración del gas, este cambio en la conductividad del sensor medida analógicamente, se convierte a una correspondiente salida de concentración mediante un circuito electrónico (Sugaya, Nishiyama, Matsutani, & Kakimoto, 2012).

Cada sensor DHT22 requiere de 1 pin digital, el MQ-137 de 1 pin analógico, el módulo RTC hace uso de 3 pines digitales y el microSD de 3 digitales más. En el Arduino nano los pines digitales son limitados y la función de cada una de los componentes que integra el circuito es fundamental en el proceso de toma y registro de datos. Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se planteó el diseño del circuito (Figura 1).

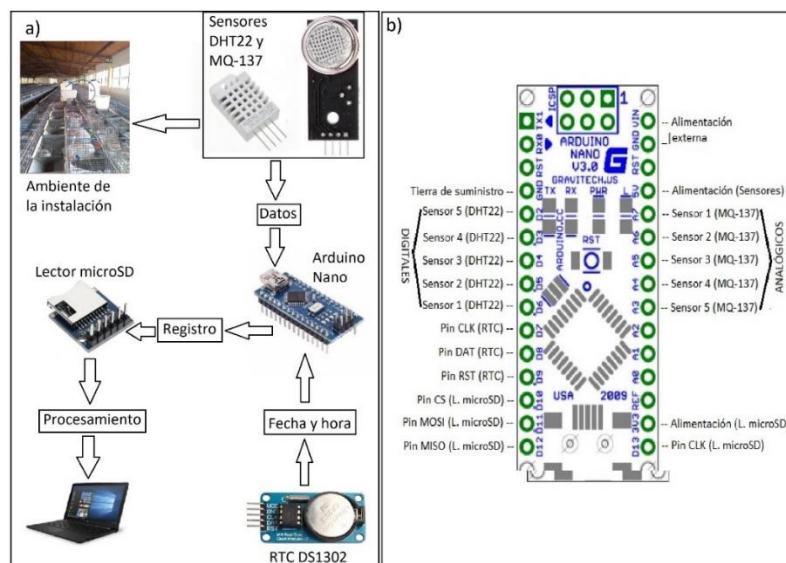


Figura 1. Planteamiento de comunicación de los componentes utilizados para el desarrollo del sistema de sensores: A) Diagrama de comunicación entre los componentes, B) Arduino Nano y los pines utilizados por cada uno de los módulos y sensores para el desarrollo.

3.2.3. Calibración

Los sensores DHT22 fueron calibrados previamente por el fabricante por lo que en este trabajo no se calibraron los mismos, así mismo estos sensores tienen alta fiabilidad y no requieren de añadir ningún circuito de tratamiento de señal (Barroso García, 2015; Rodríguez-Ramírez, García Ortega, Vasquez-Gamboa, & Juárez-Mendoza, 2017). La calibración de los sensores MQ.137, se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la hoja de datos técnicos proporcionada por el fabricante y el procedimiento descrito por Corzo Ruiz y Suárez (2007); Heriawan et al. (2013).

3.2.4. Evaluación del sistema

El sistema desarrollado y la red de sensores fueron instalados en el interior de una instalación cunícola con dimensiones de 24 m de largo y 4 m de ancho, ubicado en la unidad cunícola de la Universidad Autónoma Chapingo localizado a 19° 29' N, 98° 53' O y a una altitud de 2250 m. El clima de la región según la clasificación de Koeppen es templado húmedo o subhúmedo, prevaleciendo el

subhúmedo, Cwb (Jáuregui Ostos & Vidal Bello, 1990), con temperatura y humedad promedio anual de 15.9°C y 63.2 % respectivamente (COLPOS, 2019). Los meses más calurosos son, abril, mayo y junio con temperatura del aire y humedad relativa promedio de 18.4, 19.4, 18.9 y 50.6, 60.0, 73.9, respectivamente (Flores Velázquez et al., 2017). El arreglo de la red de sensores se llevó a cabo de manera que permita el monitoreo del mayor espacio posible cercano a las jaulas de la instalación. Se ubicaron 13 sensores de temperatura-humedad y 6 de amoniaco (Figura 2), distribuidos en las secciones de la instalación a 1.1 m de altura (sobre las jaulas de los conejos).

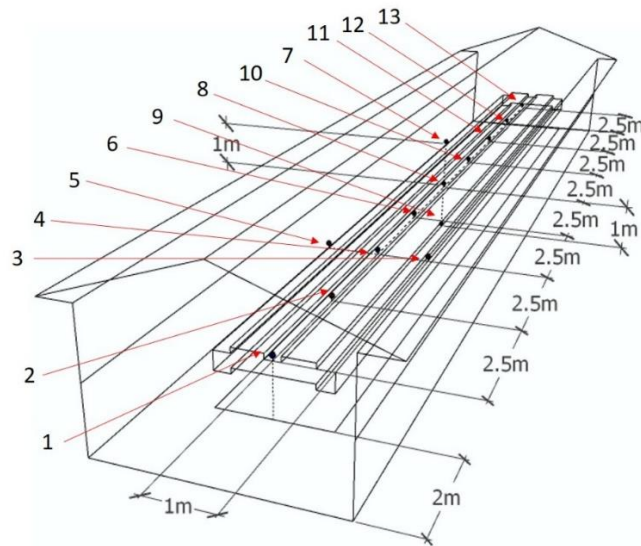


Figura 2. Distribución espacial de los sensores de amoniaco (1, 4, 7, 9, 11 y 13), temperatura y humedad (1-13) en el interior de la instalación cunícola para la evaluación del sistema.

Las mediciones de las variables ambientales se realizaron durante el 1 al 20 de julio de 2019, las lecturas se realizaron cada 10 segundos, los datos se promediaron y registraron cada 5 minutos para su posterior procesamiento.

3.3. Resultados y discusión

Se desarrolló un circuito para el microcontrolador Arduino con los módulos RTC y microSD, con puertos USB (Figura 3A), esto facilita la conexión con los

sensores de amoniaco, temperatura y humedad, para los cuales se desarrolló un circuito auxiliar (Figura 3B).

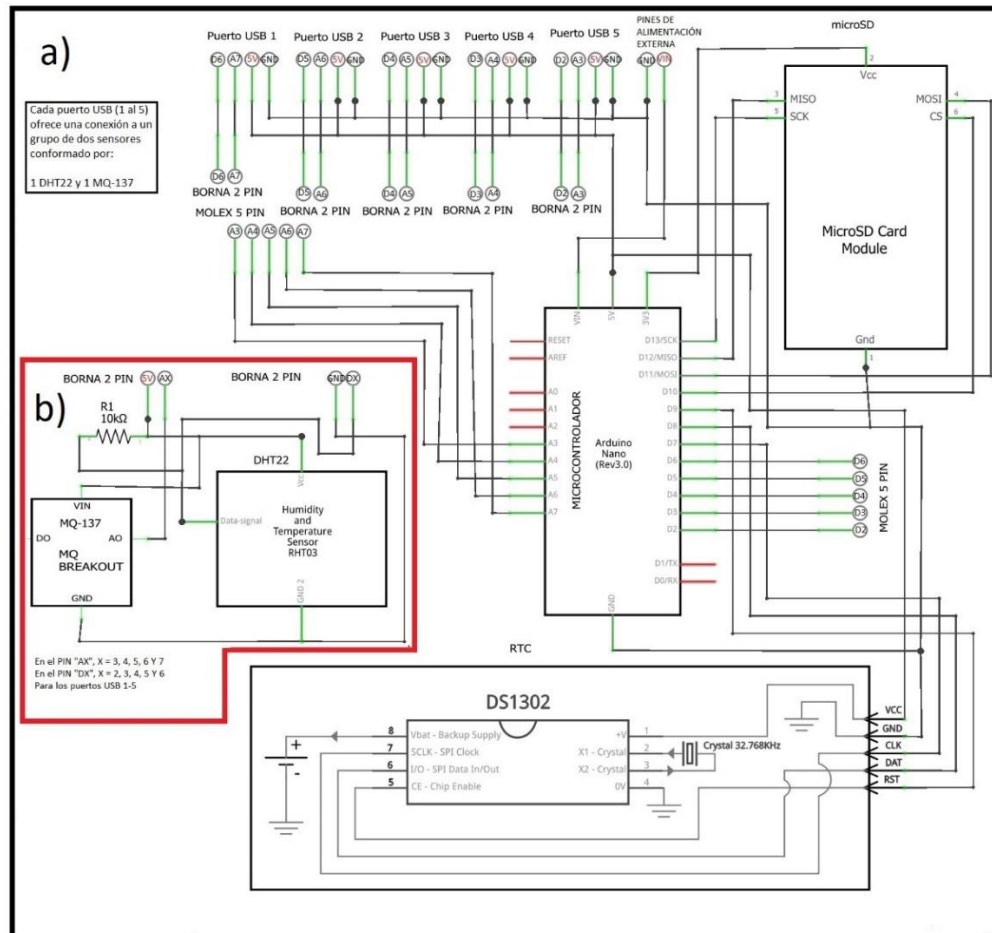


Figura 3. Diagrama electrónico de la placa madre del sistema para monitoreo de variables ambientales de una instalación cunícola. A) circuito principal, B) circuito auxiliar.

Se construyeron placas de circuito impreso, 3 placas basados en el circuito principal, debido que a cada microcontrolador se le asignaron un máximo de 5 grupo de sensores y se requiere de 15 para la medición y registro de datos de la instalación, además se construyeron 15 placas con el diseño del circuito auxiliar, una por cada grupo de sensores y se montaron los componentes (Figura 4).

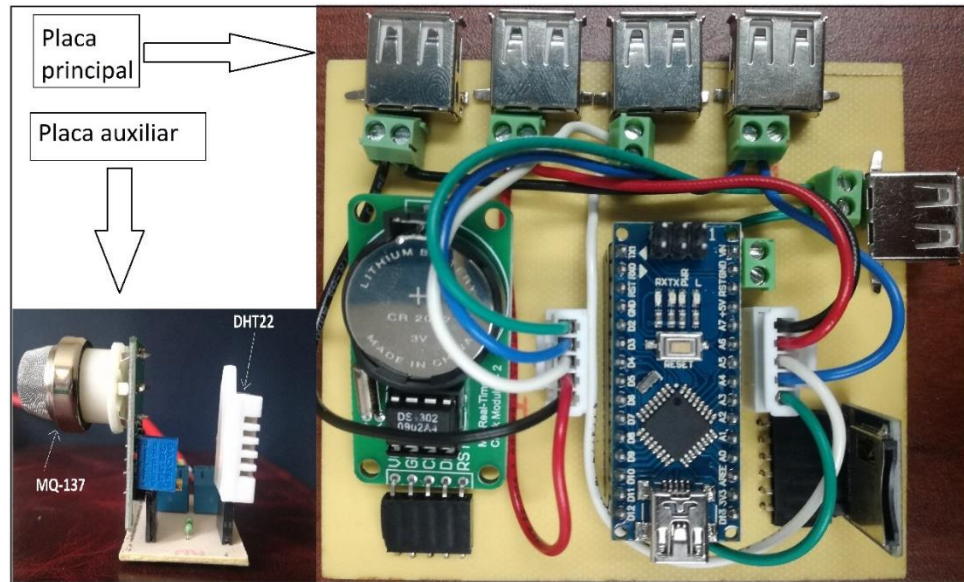


Figura 4. Placas de circuito impreso con los componentes soldados, basados en los diseños de los circuitos desarrollados, 3 placas principales y 15 auxiliares.

3.3.1 Comportamiento de los sensores

Se encontró que existe variación de medición entre los mismos sensores DHT22, de 30 muestras tomadas durante un periodo de 5 minutos, en intervalos de 10 segundos.

DHT22 (Temperatura): Se encontró una diferencia máxima de 0.7°C entre los sensores 7 y 12, el sensor 7 además presentó la mayor desviación estándar muestral siendo de ± 0.051 . El resto de los sensores solo mostraron variaciones de 0.5°C como máximo. La desviación estándar de los promedios de las muestras fue de ± 0.191 . Además, se presenta una comparación de los sensores DHT22 respecto al MLX90614, el cual presentó valores de medición por encima del promedio de los sensores DHT22 (de 24.53°C), sin embargo, también mostró un valor de desviación estándar de ± 0.102 , siendo superior al de los 15 sensores DHT22 (Figura 5).

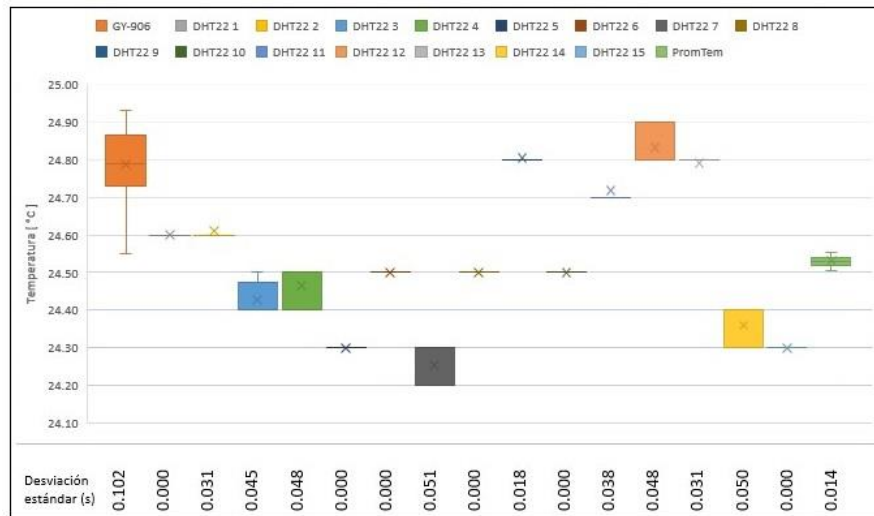


Figura 5. Comparación entre 30 muestras de temperatura tomadas con 15 sensores DHT22 y 1 MLX90614 (GY-906).

DHT22 (Humedad): En los sensores DHT22, los valores de humedad presentaron una variación similar de las sus mediciones (Figura 6), no obstante, la variación entre sensores fue mayor, alcanzando un máximo de 5.3 % entre los promedios de los sensores 8 y 13. La desviación estándar muestral máxima se presenta en el sensor 4, con un valor de ± 0.238 , mientras que la desviación entre promedio de las muestras es de ± 1.935 .

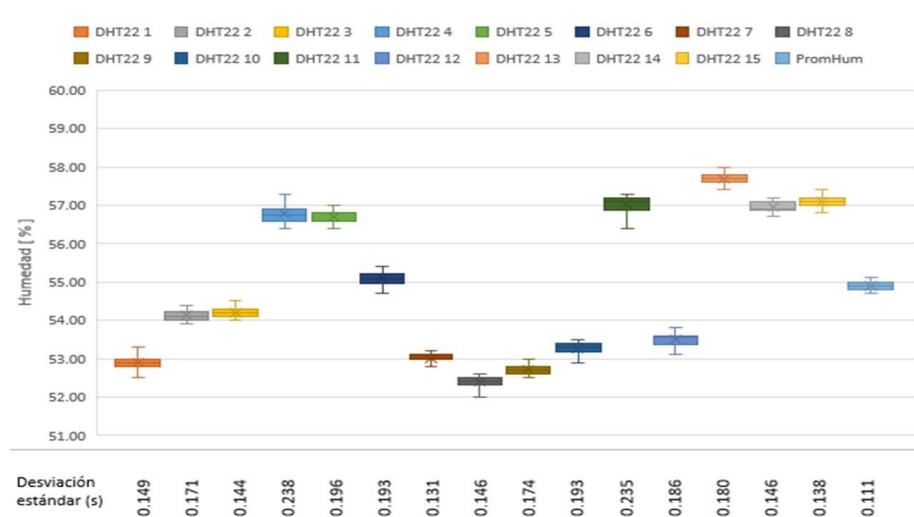


Figura 6. Comparación de 30 muestras de humedad tomadas con 15 sensores DHT22.

MQ-137 (Amoniaco): La curva de sensibilidad en representación logarítmica de los sensores MQ-137 (Figura 7), se obtuvo de los datos dados proporcionados por el fabricante, además se obtuvieron los valores necesarios para el ajuste de los sensores, donde: R_o es la resistencia en ausencia de gas amoniaco, siendo este un valor diferente para cada sensor.

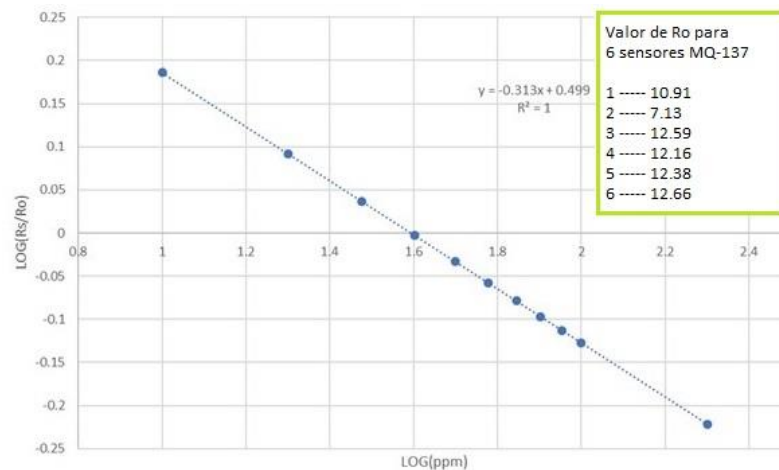


Figura 7. Curva de sensibilidad de los sensores MQ-137 y valores R_o encontrados de 6 sensores.

La red de sensores en conjunto con el sistema desarrollado para el monitoreo de las variables ambientales que se instaló en el módulo de producción cunícola por un periodo de 2 semanas, registró de manera estable durante 15 días, en la Figura 8 se observa un resumen estadístico de las variables ambientales medidos, para 5 días (del 12 al 16 de julio de 2019).

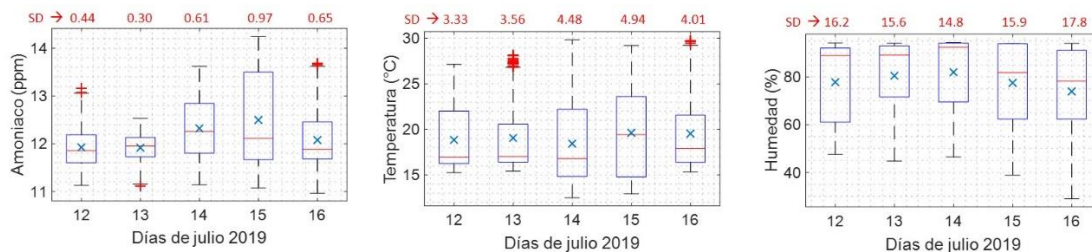


Figura 8. Resumen estadístico de 5 días, los puntos muestreados se promediaron y se obtuvieron los valores mínimos, máximos, media aritmética, mediana y desviación estándar (SD) de las variables ambientales medidos. a) amoniaco, b) temperatura, y c) humedad.

Para analizar el comportamiento de la temperatura, humedad y amoníaco durante 1 día, se presenta la Figura 9 correspondiente al 12 de julio de 2019, se puede observar el comportamiento de las variables mencionadas en seis ubicaciones diferentes dentro de la instalación, correspondientes a los puntos (1, 3, 7, 9, 11 y 13) de la Figura 2.

La primera gráfica muestra la concentración de amoníaco en partes por millón (ppm), se observa una concentración constante cercano a 12 ppm, con un aumento máximo a 14 ppm alrededor de las 9 de la mañana, este comportamiento fue registrado por 4 de los 6 sensores, en la ubicación 1 que corresponde al sensor ubicado más cerca de la puerta de entrada, presenta variación significativa respecto al resto durante todo el día, posiblemente debido a una falla del sensor, mientras que el sensor ubicado en el punto 11 no presenta variación significativa, debido a que en las jaulas alrededor de este sensor, la población de conejos era muy escasa y por lo tanto la generación de amoníaco fue limitada.

Respecto a la temperatura se puede notar que alcanza su punto más bajo de 5 a 7 de la mañana, y su valor máximo de 1 a 2 de la tarde, se observa un comportamiento homogéneo de los sensores a excepción del ubicado en el punto 9 (ubicado a 1 m por debajo del resto de los sensores), y durante el día no registra valores tan elevados como el resto, posiblemente debido a que la corriente de aire es menor en esa zona.

La humedad registrada muestra un comportamiento constante cuando la temperatura permanece constante, mientras que cuando el valor de la temperatura se eleva, el valor de la humedad también se ve alterada, registrando disminución en el porcentaje de humedad, nuevamente es notorio la diferencia entre los valores registrados por el sensor ubicado en el punto 9 respecto al resto, siendo este el que se encontraba más cerca del piso, donde la presencia del orín de los animales es más cercano al sensor.

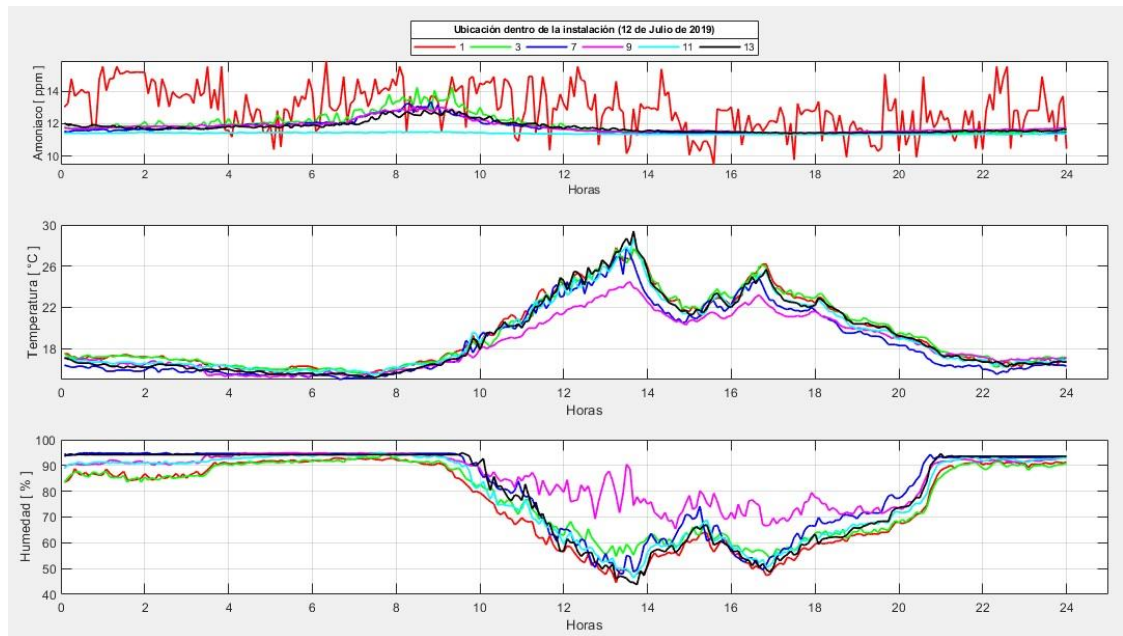


Figura 9. Concentración de amoniaco, temperatura y porcentaje de humedad de una instalación cunícola, correspondiente al 12 de Julio de 2019, registrado por los dispositivos desarrollados.

3.4. Conclusiones

Los sensores DHT22 son más precisos en la medición de temperatura en comparación a la humedad, sin embargo, la variación entre las mediciones de un sensor a otro se encuentra dentro de los valores permisibles y especificados en la hoja de datos técnicos proporcionado por el fabricante.

La placa diseñada y construida para el registro de las variables ambientales, funcionó de manera adecuada al enlazar 5 sensores DHT22 y 3 sensores MQ-137, sin embargo, implementar 5 pares de sensores con la placa principal, provoca alteraciones en las mediciones de humedad y pérdida de datos en el proceso de registro, por lo que para alimentar a los sensores MQ-137 en la configuración de 5 pares, se requiere de una fuente externa.

El sistema desarrollado funcionó de manera estable durante dos semanas, no obstante, debido a circunstancias relacionadas al manejo y cuidado de los

animales en la instalación, un par de sensores resultaron dañados y el periodo de monitoreo planteado en 20 días se redujo a 16.

3.5. Agradecimientos

Los autores agradecen a José Luis Echegaray Torres y Beatriz Mendoza Álvarez por su cooperación y permiso para ingresar a la UNIDAD DE INVESTIGACIÓN APLICADA EN PRODUCCIÓN CUNÍCOLA.

3.6. Literatura citada

Adafruit Industries. (2019). Micro SD card breakout board tutorial. Recuperado de <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-micro-sd-breakout-board-card-tutorial.pdf>

Ames, D. (1980). Thermal environment affects production efficiency of livestock. *BioScience*, 30(7), 457–460. <https://doi.org/10.2307/1307947>

Barraza, E., Enrique, B., Plata, G., Francisco, J., Reséndiz, R., Arreguín, R., et al. (2017). Diseño de tarjeta electrónica para monitoreo de temperatura y humedad en apicultura. 6(3), 66–77. Recuperado de <http://www.mecamex.net/revistas/LMEM/revistas/LMEM-V06-N03-01.pdf>

Barroso, A. (2015). Control y monitorización de un invernadero a través de una aplicación móvil. *Doctoral dissertation*. Recuperado de <http://oa.upm.es/36945/>

COLPOS. (2019). Normales climatológicas. Consultado el 12 de febrero de 2019 en <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/repor2/nrm15c.htm>

Corzo, C. L., & Suárez, E. A. (2007). Monitoreo electrónico de temperatura, humedad y amoniaco y sistema de medición para granjas avícolas. 67(6), 14–21. Recuperado de http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/2041/CIETA-2017_paper_24.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Dhas, Y. J., & Jeyanthi, P. (2017). Environmental pollution monitoring system using internet of things (IoT). *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 10(3), 1391–1395. Recuperado de https://www.jchps.com/issues/Volume10_Issue3/20171025_080123_0030517.pdf

El-Tohamy, M. M., Kotp, M. S., & Mohamed, A. H. (2012). Semen characteristics

- and oxidative/antioxidative status in semen and serum of male rabbits supplemented with antioxidants during heat stress. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 2(2), 175–183. Recuperado de http://www.iaujournals.ir/article_514331_b1bb3babc9592d98d66e56a0c95d55d6.pdf
- Electronilab. (2016). Sensor de Temperatura y Humedad DHT22. *Electronilab*. 22, 1–5. Recuperado de <https://electronilab.co/tienda/sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11/>
- Ferdoush, S., & Li, X. (2014). Wireless sensor network system design using raspberry Pi and Arduino for environmental monitoring applications. *Procedia Computer Science*, 34, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Ojeda, W., & Ruíz-García, A. (2017). Thermal and ammonia concentration gradients in a rabbit barn with two ventilation system designs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 134–140. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p134-140>
- Fuentes, M., Vivar, M., Burgos, J. M., Aguilera, J., & Vacas, J. A. (2014). Design of an accurate, low-cost autonomous data logger for PV system monitoring using Arduino™ that complies with IEC standards. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 130, 529–543. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.08.008>
- Heriawan, R., Suciati, S. W., & Supriyanto, A. (2013). Alat pengontrol emisi gas amonia (NH₃) di peternakan ayam berbasis mikrokontroler ATmega 8535 menggunakan sensor gas MQ-137. *JURNAL Teori dan Aplikasi Fisika*, 01(01), 69–73. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.23960%2Fjtaf.v1i1.480>
- 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. *Transactions of the ASABE*, 52(3), 937–947. <https://doi.org/10.13031/2013.27391>
- Jáuregui, E., & Vidal, J. (1990). Investigaciones geográficas : boletín del Instituto de Geografía. *Investigaciones geográficas*. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111981000100002
- Kiani, S., Minaei, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M. (2016). A portable electronic nose as an expert system for aroma-based classification of saffron. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 156, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.05.013>
- Koo, J. J. P., May, Á. V. D., Pacho, J. I. E., May, O. A. C., & García, H. M. (2018). Análisis computacional de factores intrínsecos en cultivo in vitro de la stevia

- rebaudiana morita II. *Pistas Educativas*, 40(130). Recuperado de <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1760>
- López, J., Aria, J. C., & Quinter, E. A. (2016). Medidor electrónico interactivo de consumo de energía eléctrica para uso residencial. *Prospect*, 14(1), 60. <https://doi.org/10.15665/rp.v14i1.639>
- Marín, G., Lozada, R. A., Huamán, C. A., & Bolaños, R. A. (2017). Construcción de un temohigrómetro prototipo con base datalogger en placa Arduino para interior de edificaciones. *Campus*, 22(24), 171–178. <https://doi.org/10.24265/campus.2017.v22n24.02>
- Marinelli, M., & Urquijo, R. R. (2017). Sistema de Control de una cámara de germinación hidropónica con IoT . *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 1101–1107. Recuperado de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/63881>
- Mayan, M. H., & Merilan, C. P. (1972). Effects of ammonia inhalation on respiration rate of rabbits. *Journal of Animal Science*, 34(3), 448–452. <https://doi.org/10.2527/jas1972.343448x>
- Moreno-Illorca, R. A. (2013). Seguimiento intra-diario del funcionamiento de ecosistemas forestales en espacios protegidos mediante cámaras de bajo coste. *ResearchGate*, (1), 1–4.
- Morrison, S. R. (1983). Ruminant heat stress: effect on production and means of alleviation. *Journal of Animal Science*, 57(6), 1594–1600. <https://doi.org/10.2527/jas1983.5761594x>
- Ngwabie, N. M., Jeppsson, K. H., Nimmermark, S., Swensson, C., & Gustafsson, G. (2009). Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. *Biosystems Engineering*, 103(1), 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.004>
- Plaza, P., Sancristobal, E., Fernandez, G., Castro, M., & Perez, C. (2016). Collaborative robotic educational tool based on programmable logic and Arduino. *Technologies Applied to Electronics Teaching (TAEE)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/TAEE.2016.7528380>
- Rodríguez-Ramírez, F., García, I., Vasquez-Gamboa, S. A., & Juárez-Mendoza, L. (2017). Análisis, diseño e implementación de un invernadero automatizado para la producción de fresa en Tehuacán. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 1–3, 8–17.
- Sergi, O. (2012). Smart Chemical Sensors: Concepts and Application. *Universitat de Barcelona*. Recuperado de

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=76075>

- Sudarmaji, A., Gunawan, B., Hilyana, S., Fernando, H., & Margiwiyatno, A. (2018). The application of general MOS gas sensors for discriminating formalin content. *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 16(6), 2905. <https://doi.org/10.12928/telkomnika.v16i6.10363>
- Tincopa, J. P., Baltuano, O., & Bedregal, P. (2015). Desarrollo de una red inalámbrica para el registro automático de parámetros en los laboratorios de técnicas analíticas nucleares Jean. *Revista Informe Tecnológico Científico*, 15(1), 26–30.
- Winsen. (2012). Ammonia gas sensor (model : MQ137) . *Manual*, 6. Recuperado de <https://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq137.pdf>
- Yang, S. F., & Liu, Y. J. (2013). Research of the harmful gas detection and control system in dairy. *Applied Mechanics and Materials*, 347–350, 600–603. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.347-350.600>

4. SIMULACIÓN DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD) DEL AMBIENTE DE UNA INSTALACIÓN CUNÍCOLA

Resumen

La concentración de amoníaco (NH_3) y la temperatura del aire circundante al hábitat del conejo, condicionan procesos básicos de salud como respiración y alimentación. El ambiente en una instalación cunícola, está condicionado en gran parte al sistema de ventilación (climatización). En este estudio se construyó y evaluó un modelo numérico basado en dinámica de fluidos computacional (CFD) para simular la dinámica del aire de una granja rustica. Se analizó el gradiente térmico y concentración de amoníaco, bajo 3 ángulos de incidencia del viento (0° , 45° y 90° respecto al eje horizontal Z de la instalación). Los resultados de las simulaciones mostraron en la zona ocupada por los animales (ZOA) la concentración de amoníaco con respecto a lo emitido por la fuente, se reduce un 37.3 % en el caso más favorable (cuando la dirección del viento es a 45°), y de 21.2 % en el caso menos favorable (dirección del viento a 0°), y la temperatura interna presentó una diferencia máxima de 2°C respecto a la temperatura exterior.

Palabras clave: Ambiente, amoníaco, CFD, cunícola, temperatura.

4.1. Introducción

La calidad del aire en el interior de instalaciones dedicadas a la producción animal, es un factor esencial para garantizar salud y comodidad de los animales y productores (Ngwabie, Jeppsson, Nimmermark, Swensson, & Gustafsson, 2009; Calvet et al., 2014; Kwon, Lee, & Ha, 2016). En instalaciones modulares para producción cunícola, las variables ambientales más importantes son; temperatura, humedad y emisiones de gases nocivos (Bodnar, Makra, Bodnar, & Privoczki Z., 2019). La temperatura entre 25 y 30°C , incrementa la carga de calor en los conejos, por encima de los 30°C los efectos que se presentan son disminución en el consumo de alimentos y la tasa de fertilidad, afectando el rendimiento de la producción (Marai, Habeeb, & Gad, 2002). Los conejos son susceptibles al estrés por calor debido a que la cantidad de glándulas sudoríparas funcionales con que cuentan no son suficientes para eliminar el

exceso de calor corporal (Marai et al., 2002). El estrés por calor, es una combinación de un incremento de temperatura y el consecuente descenso de humedad, se usa el indicador índice de temperatura-humedad, cuyo parámetro fue modificado y usado en conejos por (Marai, Ayyat, & Abd El-Monem, 2001; Marai et al., 2002). El amoníaco (NH_3) tiene efecto sobre la acidificación del suelo, emisión de material particulado y óxido nítrico (Calvet et al., 2014; Drewry, Choi, Powell, & Luck, 2018). La emisión de gases de las actividades pecuaria y agricultura, contribuyen al efecto invernadero, ya que son la principal fuente de emisión de NH_3 y en el particular de los conejos es el causante de enfermedades respiratorias (Krupa, 2003; Bodnar et al., 2019). Existe una correlación entre el ambiente interno de una granja y el confort de los habitantes, por lo que se requiere ampliar el análisis sobre la dinámica del clima dentro de la zona ocupada por los animales como respuesta al sistema de ventilación (Norton, Grant, Fallon, & Sun, 2009).

La ventilación de una instalación pecuaria es un fenómeno que permite el manejo de variables de temperatura, humedad y concentraciones de gases. Se han realizado investigaciones sobre el sistema de ventilación de una instalación pecuaria, usando métodos como; mediciones directas, aplicación del teorema de Bernoulli, suma de caudales de volumen, gas trazador y técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) (Wu, Zhai, Zhang, & Nielsen, 2012). CFD es una herramienta utilizada para el modelado de instalaciones pecuarias, incluye posibilidades potenciales para simular las condiciones importantes que pueden influir sobre el clima en una instalación pecuaria (B. Bjerg, Svidt, Zhang, & Morsing, 2000).

Entre las investigaciones que se han llevado a cabo utilizando dinámica de fluidos computacional, se encuentra el análisis en cerdos, (B. Bjerg et al., 2000; Li, Rong, Zong, & Zhang, 2017) estudiaron la velocidad del aire, (Bjarne Bjerg, Rong, & Zhang, 2018; Li, Rong, & Zhang, 2018) sobre temperatura y estrés por calor, (Li Rong, Bjerg, & Zhang, 2015; L. Rong & Aarnink, 2019) sobre emisiones de

amoníaco y (Kwon et al., 2016) se enfocaron en la generación de polvo dentro de las instalaciones. En vacas, (Norton, Grant, Fallon, & Sun, 2010; Fernando Rojano, Mario Mondaca, & Christopher Y Choi, 2013) estudiaron la transferencia de calor, (Mondaca, Choi, & Cook, 2019) sobre la tasa de ventilación, mientras que (Gebremedhin, Wu, & Perano, 2016) llevaron a cabo un estudio más completo sobre velocidad del aire y su influencia en la temperatura, humedad y transferencia de calor, (Ngwabie et al., 2009; Drewry et al., 2018) se enfocan en las emisiones de metano y amoníaco, así como también de CO₂ y N₂O. En aves se encuentran los trabajos de (Fidaros, Baxevanou, Bartzanas, & Kittas, 2018; Rojano et al., 2016, 2019) quienes modelaron el clima interno y emisiones de calor, y las simulaciones sobre el flujo de aire, temperatura, humedad y emisiones de amoníaco realizados por (Blanes-Vidal, Guijarro, Balasch, & Torres, 2008; Du et al., 2019; Tong, Hong, & Zhao, 2019). No obstante, en conejos los estudios son pocos, las simulaciones realizadas por (Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Ojeda, & Ruíz-García, 2017), sobre el gradiente de temperatura y concentración de amoníaco, y las llevadas a cabo por (Jin et al., 2018) sobre de la distribución del flujo de aire del ambiente interno de instalaciones cunícolas.

El objetivo de este trabajo fue construir y evaluar un modelo basado en CFD para simular y analizar la distribución de la temperatura y concentración de amoníaco, de una instalación de conejos con ventilación natural.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Descripción del experimento

La fase experimental se llevó a cabo en una granja con dimensiones de 24 m de largo, 4m de ancho y 2.4 a 3.3 m de altura (Figura 1), perteneciente a la unidad de investigación aplicada en producción cunícola ubicada en la Universidad Autónoma Chapingo, México, localizado a 19° 29' N, 98° 53' O y a una altitud de 2250 m.

El clima de la región según la clasificación de Koeppen es templado húmedo o subhúmedo, prevaleciendo el subhúmedo, Cwb (Jáuregui Ostos & Vidal Bello, 1990), con temperatura y humedad media anual de 15.9°C y 63.2 % respectivamente (COLPOS, 2019). Los meses más calurosos son abril, mayo y junio, con medias en temperatura y humedad relativa de 18.4, 19.4, 18.9 y 50.6, 60.0, 73.9, respectivamente (Flores-Velázquez et al., 2017).

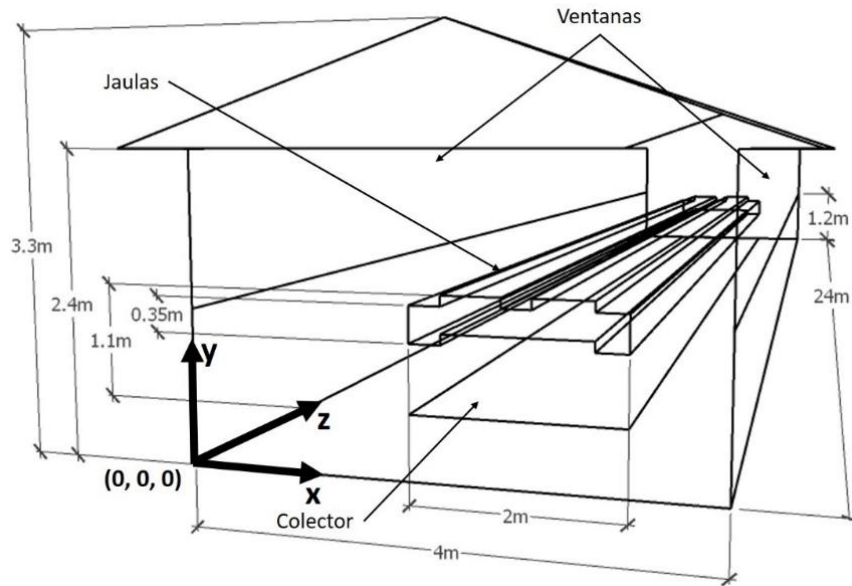


Figura 1. Características de la granja cunícola experimental.

En el exterior a la granja se instaló una estación climática a 6 m de altura, se registraron datos de temperatura y humedad relativa (S-TBH-M002, Onset Computer Co., Bourne, MA, USA; $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 2.5\%$), radiación (S-LIA-M003, Onset Computer Co., Bourne, MA, USA; 0 a $2500\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, $\pm 5\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$), velocidad del viento (S-WSB-M003, Onset Computer Co., Bourne, MA, USA; $\pm 1.1\text{ m s}^{-1}$), y dirección del viento (S-WDA-M003, Onset Computer Co., Bourne, MA, USA; $\pm 5^{\circ}$). En el interior de la granja se utilizó un sistema de monitoreo basado en Arduino para registrar información de 13 sensores que miden temperatura (DHT22 AM2302, Aosong Electronics Co., Ltd., GZ, CHN; $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y 6 sensores que miden amoníaco (MQ-137, Hanwei Electronics Co., Ltd., ZZ, CHN; 5 a 200 ppm), además se instalaron seis termopares (TC6, Tipo T, Onset

Computer Co., Bourne, MA, USA; ± 0.6 °C) que fueron ubicados al interior de la instalación 4 en el techo y 2 en el piso. La posición de los sensores (Cuadro 1), fue diseñada para medir la dinámica espacial en un plano horizontal a 1.3 metros de altura, por arriba de las jaulas de los conejos, y un plano vertical con dos sensores colocados a una altura de 0.1 m y 2.3 en el centro de la granja. Del total de sensores se realizaron mediciones cada 10 s y se registró un dato cada 5 min con el promedio de este intervalo.

Cuadro 1. Ubicación de los sensores al interior de la granja cunícola, en coordenadas cartesianas respecto al origen observado en la Figura 1.

Sensor	Coordenadas (x, y, z) en m.			
DHT22	1-(2.0, 1.1, 2.0)	2-(2.0, 1.1, 4.5)	3-(3.0, 1.1, 7.0)	4-(2.0, 1.1, 7.0)
	5-(1.0, 1.1, 7.0)	6-(2.0, 1.1, 9.5)	7-(2.0, 2.1, 12.0)	8-(2.0, 1.1, 12.0)
	9-(2.0, 0.1, 12.0)	10-(2.0, 1.1, 14.5)	11-(2.0, 1.1, 17.0)	12-(2.0, 1.1, 19.5)
	13-(2.0, 1.1, 22.0)			
MQ-137	1-(2.0, 1.1, 2.0)	2-(2.0, 1.1, 7.0)	3-(2.0, 2.1, 12.0)	4-(2.0, 0.1, 12.0)
	5-(2.0, 1.1, 17.0)	6-(2.0, 1.1, 22.0)		

4.2.2. Construcción del modelo numérico

Geometría y dominio computacional

Se construyó un modelo computacional en 3-D basado en dimensiones y características del modelo prototipo de la Figura 1. Se construyó un dominio computacional de 70.2m x 50.2m x 26.4m, cuyo dimensionamiento fue atendiendo los criterios de (Rojano et al., 2015, 2016), con un volumen total de 93,034.656 m³.

Mallado

Se realizó un mallado con elementos hexaédricos, el cual posee la ventaja de que los elementos pueden ser subdivididos de manera anisotrópica repetidamente, sin deterioro de la calidad del elemento y utiliza los recursos computacionales eficientemente (Biswas & Strawn, 1998). Siguiendo el

procedimiento usado por Mondaca et al. (2019) para garantizar la independencia de la malla en el cálculo de los resultados, se analizaron 5 mallas (334,974; 617,415; 1,086,435; 1,939,950 y 3,506,683 elementos), en cada configuración se muestreo la temperatura en el eje z al interior de la instalación, se compararon los valores con el estadístico RMSE (Figura 2). El análisis mostró un RMSE = 0.008 entre el mallado de 1.9 millones y 3.5 millones. Para obtener los resultados finales se utilizó el mallado de 1.9 millones de elementos en las simulaciones.

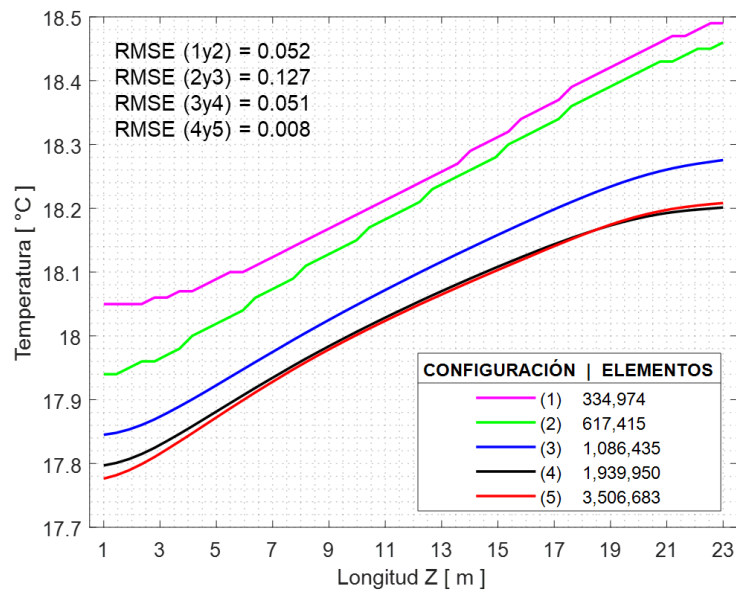


Figura 2. Temperatura muestreada en el eje z en el centro de la instalación y RMSE calculado para 5 diferentes cantidades de elementos en el mallado.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera (Cuadro 2), fueron establecidas basadas en el trabajo de (Flores-Velázquez et al., 2017), usando los valores de temperatura, velocidad y dirección del viento registrados por la estación climática en el exterior de la granja. Los datos de amoníaco en instalaciones de conejos, de acuerdo con investigaciones de Calvet, Cambra-López, Estellés Barber, y Torres (2011), quienes obtuvieron concentraciones de 0.78 a 6.1 mg m⁻³, y de 10.9 a 14.3 mg m⁻³ durante invierno, mientras que Beurskens y Hol (2004) reportan valores altos durante invierno de 8.5 a 10 mg m⁻³. En esta simulación se utiliza el promedio

de los valores máximos de ambos trabajos, siendo 10.93 mg m⁻³, equivalente a 15.43 ppm. La presión atmosférica en el dominio se estableció en 98.1 kPa (correspondiente a 2250 m sobre el nivel del mar).

Cuadro 2. Resumen de las condiciones de frontera usadas durante la simulación.

Frontera	Tipo	Condición
Entrada	Velocity inlet	Temperatura: 17 °C; Velocidad del viento: 0.25 m/s Dirección del viento: 161° Componentes (x = -0.87, y = 0, z = -0.48)
Salida	Pressure-outlet	Presión: 0 Pa
Aire externo	interior	Aire
Suelo externo	Wall	Suelo
Jaula	interior	Temperatura: 308 K
Suelo interno	Wall	Material concreto; Temperatura: 19.8 °C
Colector	Wall	Temperatura: 34.8 °C; Amoniaco: 15.4 ppm = 0.0154 g/kg
Aire interno	Interior	Aire
Techo	Wall	Material madera; Espesor: 0.5 cm; Temperatura: 23.8 °C
Paredes	Wall	Material madera; Espesor: 1 cm
Ventanas	Porous jump	Malla; Permeabilidad: 3.98e-09 (m ²); Espesor: 0.0032 (m) Coeficiente de arrastre: 19185.7 (1/m)

Ecuaciones que gobiernan y procedimiento numérico

En resumen, la dinámica de fluidos computacional se rige por un grupo de ecuaciones en derivadas parciales conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes, la cual se puede expresar de forma compacta en la llamada ecuación de transporte y se muestra en la ecuación 1 (Flores-Velázquez et al., 2017; Versteeg & Malalasekera, 2007).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho u\phi) = \nabla(\nabla\Gamma\phi) + S_\phi \quad (1)$$

Donde: ∂ = derivada; ρ = densidad (kg m^{-3}); t = tiempo (s); ∇ = divergencia; φ = variable de estado (1, u , v , w , i , etc.); u = velocidad del viento (m s^{-1}); Γ = coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y S = término fuente.

En el procedimiento numérico se usó el método de solución SIMPLE con discretizaciones espaciales de segundo orden y valores de los residuales establecidos para convergencia de la solución numérica en $1\text{e-}09$ para energía y amoníaco, mientras que $1\text{e-}06$ para continuidad, velocidad, κ y ϵ .

Evaluación del modelo numérico

La evaluación del modelo se llevó a cabo mediante análisis estadístico (media, desviación estándar y RMSE), entre los resultados de la simulación y los datos experimentales de 6 puntos de amoníaco y 13 puntos de temperatura (Figura 2). Los resultados muestran una media de concentración de amoníaco en datos medidos y simulados de 12.58 ± 0.22 ppm y 12.73 ± 1.43 ppm respectivamente. Respecto a la variable temperatura del aire la media obtenida fue de 19.37 ± 0.39 °C para los datos medidos y 19.61 ± 0.1 °C para los simulados. El porcentaje de error calculado de los seis puntos en amoníaco oscila entre 0.4 a 18.2 % y de los 13 puntos en temperatura oscila entre 0.12 a 4.25 %. La comparación entre los datos medidos y simulados (Figura 3), mostró un RMSE de 1.16 y 0.41 para amoníaco y temperatura respectivamente.

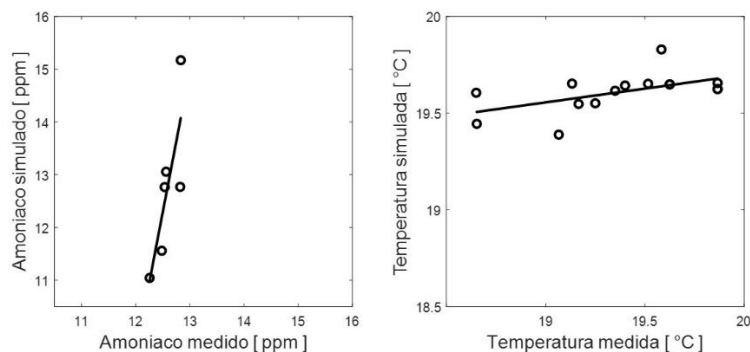


Figura 3. Comparación entre datos medidos y simulados para amoníaco y temperatura.

Los resultados de la evaluación entre los datos medidos y simulados, de manera gráfica muestran que bajo las condiciones simuladas los datos se ajustan a los valores medidos, lo que aporta confianza numérica para el uso del modelo y poder inferir la dinámica del aire en el interior de la granja. En consecuencia, se usa el modelo para predecir las variaciones de concentración de amoniaco en la ZOA y la variación vertical de la concentración de amoniaco y temperatura del aire dentro de la granja en tres cortes transversales A, B y C, ubicados a 4, 12 y 20 m respectivamente, en la dirección del eje z (Figura 4). Se usaron como condiciones de frontera datos de temperatura del aire de 22 °C, velocidad del viento exterior de 2.5 m s⁻¹ y 3 direcciones de incidencia del viento 0°, 45° y 90° respecto al eje z.

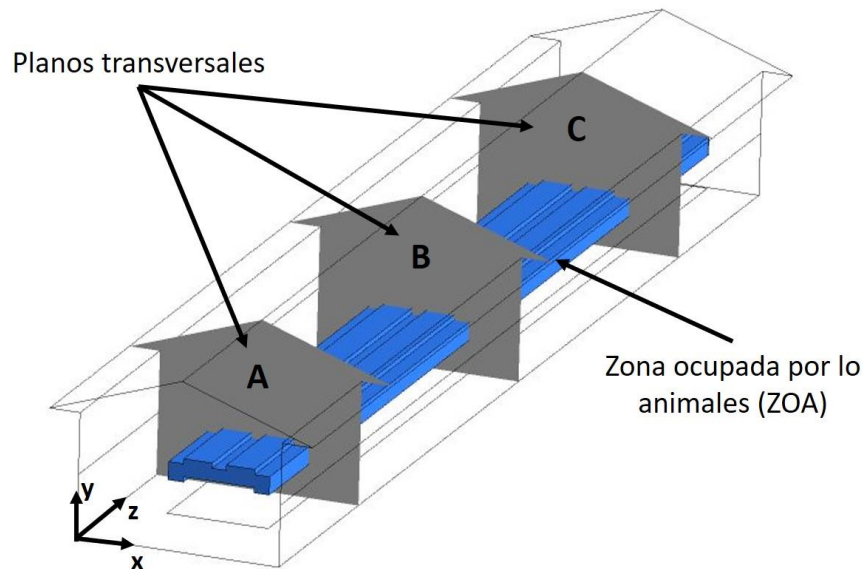


Figura 4. ZOA y planos transversales creados para el análisis de gradiente térmico y concentración de amoniaco.

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Variación de la velocidad del aire y la concentración de amoníaco en la ZOA

Los resultados de la simulación a diferentes ángulos de incidencia del viento muestran, que la concentración de amoníaco en la ZOA respecto al eje z no es homogénea (Figura 4). Se puede observar con dirección del viento a 0° , vectores de velocidad del aire de magnitud entre 0.3 y 0.5 m s^{-1} , y el amoníaco presenta un incremento, de 8.5 a 14 ppm a lo largo de la granja, presentando acumulación del gas en la zona posterior de la granja, debido a la dirección del flujo de aire. Cuando la dirección del viento incide a 45° , la velocidad del aire es menor a 0.4 m s^{-1} , la concentración de amoníaco oscila entre 9.3 y 10.5 ppm , sin embargo, en la zona posterior de la granja se visualiza una disminución de 5.5 ppm . Con dirección del viento a 90° , la velocidad es menor a 0.3 m s^{-1} , debido a que el límite superior de la ZOA se encuentra a 10 cm por debajo de la altura a la que se localizan las ventanas de la granja, causando que el flujo de aire pase a través de la instalación, sin obstaculizarse por la ZOA, la concentración de amoníaco tiene un comportamiento simétrico respecto al centro de la granja, en la zona frontal de 0 a 5 m el amoníaco aumenta de 5 a 11 ppm , en la zona central 5 a 20 m , la variación es de 11 a 11.6 ppm , y en la zona posterior el amoníaco disminuye de 11 a 7 ppm .

Las concentraciones medias de amoníaco en la ZOA son de; 12.14 ppm , 9.65 ppm y 11.04 ppm con dirección del viento a 0° , 45° y 90° respectivamente. Estas concentraciones medias de amoníaco representan disminuciones respecto a la fuente de emisión de 21.2% cuando la dirección del viento es a 0° , de 37.3% a 45° y de 28.3% a 90° . Se observa que, de las tres diferentes direcciones estudiadas, el caso más favorable es cuando el viento incide con dirección de 45° , debido a que la concentración de amoníaco en la ZOA se reduce en mayor porcentaje.

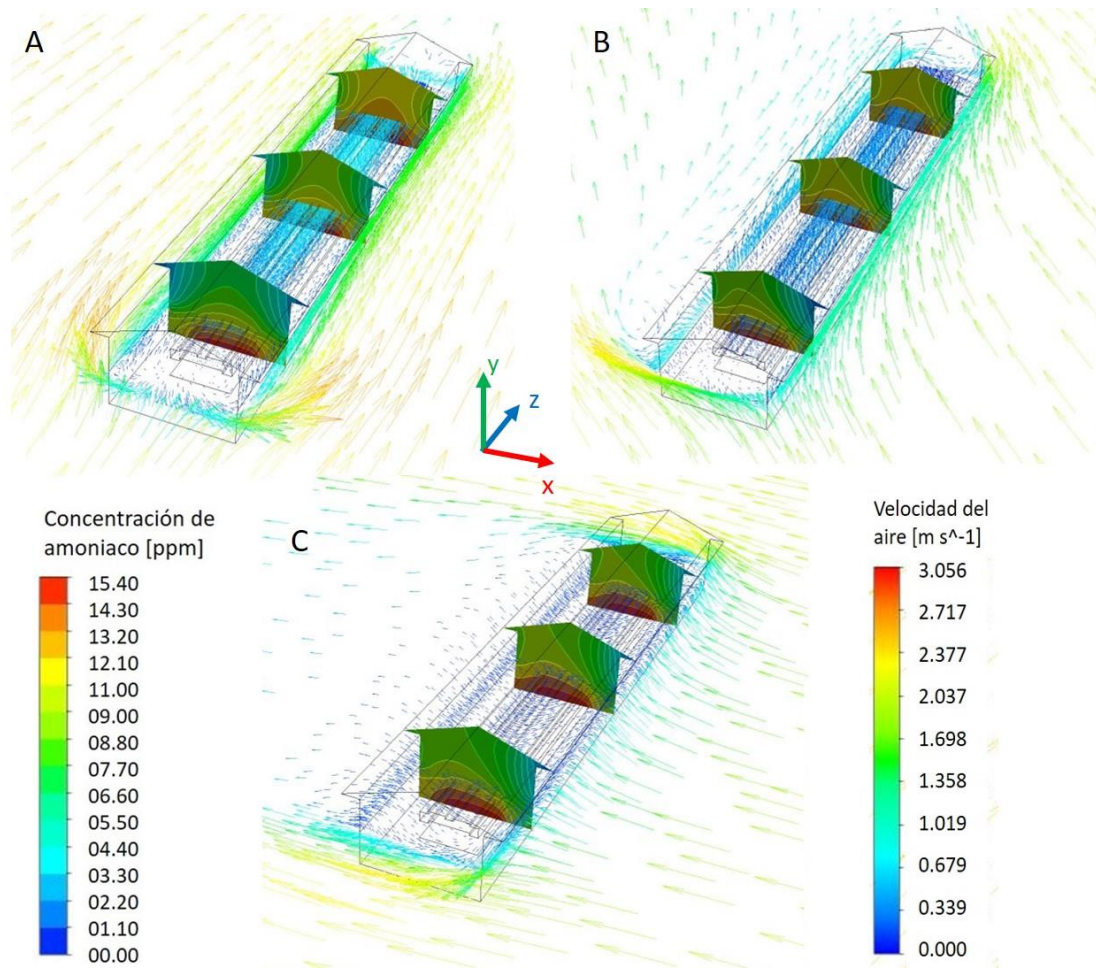


Figura 5. Velocidad del aire y concentración de amoniaco: A. Dirección del viento a 0°, B. Dirección del viento a 45° y C. Dirección del viento a 90°.

4.3.2. Variación vertical de la concentración de amoniaco y temperatura del aire

Los resultados muestran que la variación de la concentración de amoniaco y la temperatura del aire con respecto a la altura, presenta un gradiente positivo de temperatura y un decremento en la concentración de amoniaco.

Amoniaco y temperatura en la sección transversal A

En esta sección la variación máxima de amoniaco es de 10 ppm, de una concentración de 15.4 ppm emitido por la fuente, disminuye a 5 ppm en lo más alto de la granja y se presenta cuando la dirección del viento es a 45°, no

obstante, en esta dirección del viento, se presenta la concentración de amoníaco más baja comparado con la concentración encontrada en las otras direcciones del viento, con disminución de 15.4 ppm a solo 7 ppm. Respecto a la temperatura del aire, cuando la dirección del viento es a 45°, esta presenta mayor variación y una temperatura más elevada respecto a los otros dos casos, la temperatura oscila entre 19.8 y 21.6 °C mientras que con dirección del viento a 0° y 90°, la temperatura alcanza un máximo de 21.3 °C (Figura 6).

Amoníaco y temperatura en la sección transversal B

En esta sección ubicada en el centro de la granja, el amoníaco se comporta de manera similar a lo visto en la sección A cuando la dirección del viento es a 45° y 90°, donde decrece de los 15.4 ppm emitido por la fuente a 5 y 7.3 ppm respectivamente. Cuando la dirección del viento es a 0° la disminución de concentración de amoníaco se da de 15.4 a 9.2 ppm, que comparado a la sección A esta presenta una concentración de 2 ppm más elevada. La temperatura del aire aumenta de los 19.8 °C a un máximo de 21, 21.7 y 21.3 °C cuando la dirección del viento es a 0°, 45° y 90° respectivamente (Figura 7).

Amoníaco y temperatura en la sección transversal C

Con dirección de viento a 90°, la concentración de amoníaco es similar a las secciones anteriores, es decir, el decremento en la concentración es de 15.4 a 7.5 ppm, solamente 0.5 y 0.2 ppm más elevada que en la sección A y B respectivamente. Con dirección del viento a 45° la concentración de amoníaco en esta sección disminuye de 15.4 a 5.8 ppm. Cuando la dirección del viento es 0° la concentración de amoníaco decrece de 15.4 a 12 ppm, lo que equivale a la menor variación de amoníaco de las tres secciones analizadas. La temperatura en esta sección oscila de 19.8 °C a 20.6, 21.5 y 21.3 °C para dirección del viento a 0°, 45° y 90° respectivamente (Figura 8).

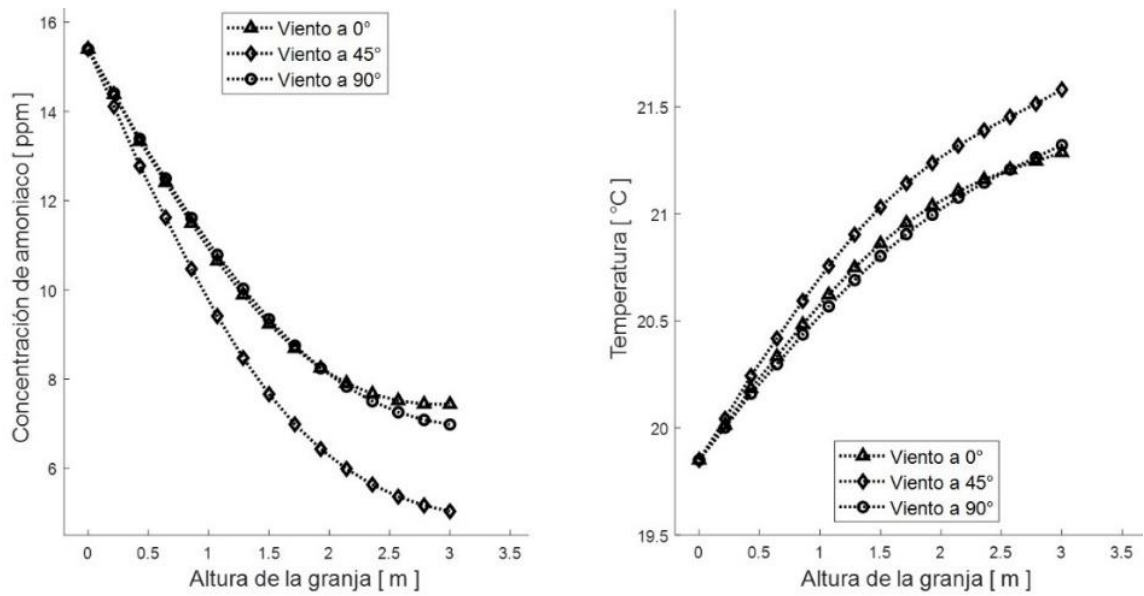


Figura 6. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal A.

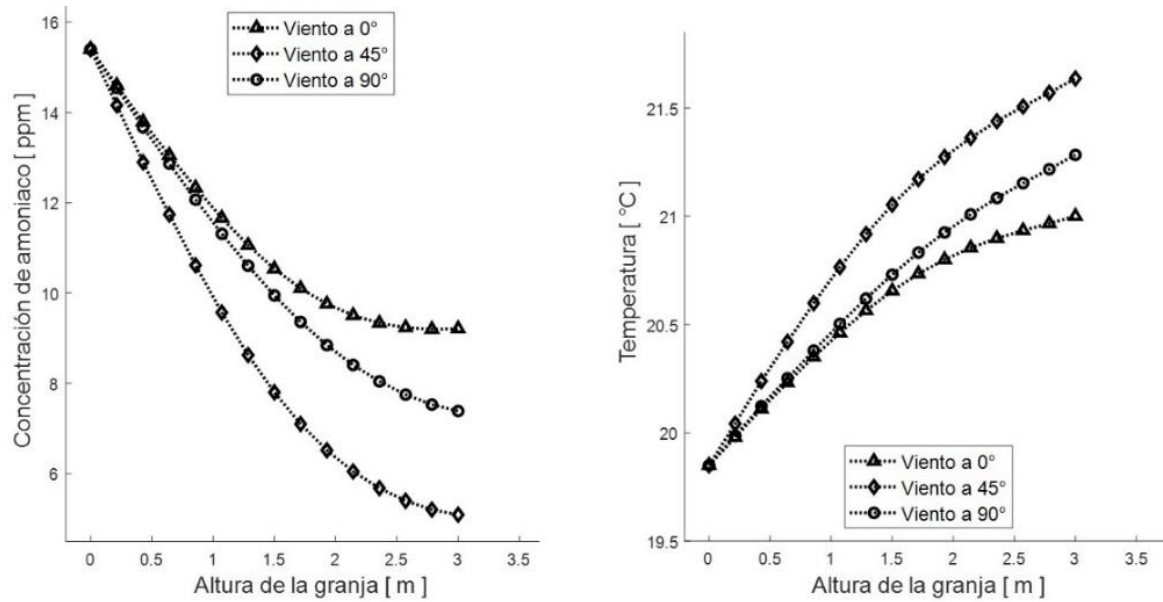


Figura 7. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal B.

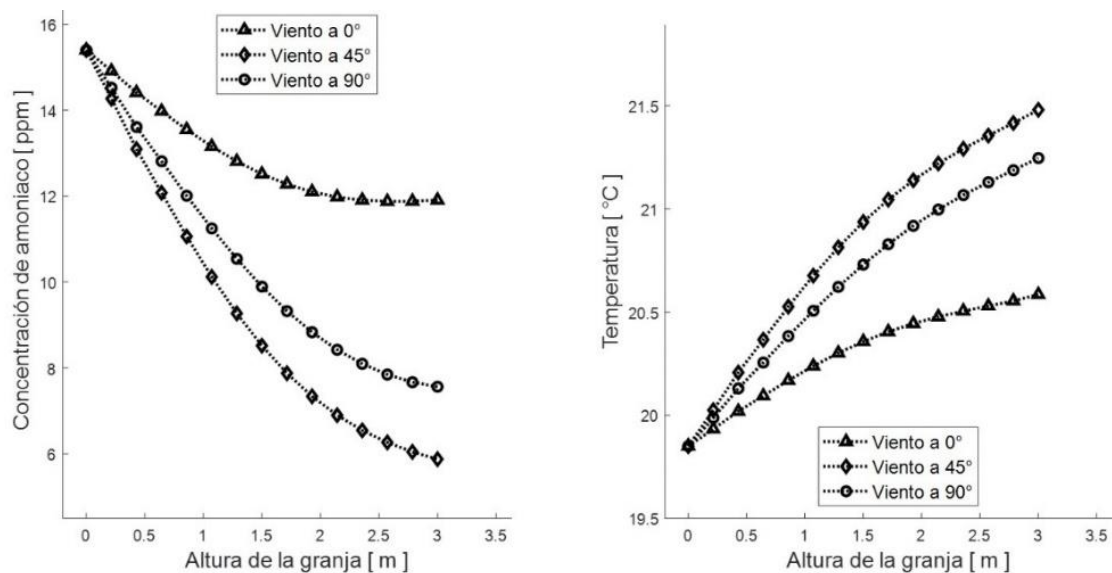


Figura 8. Concentración de amoniaco y temperatura del aire en la sección transversal C.

4.4. Conclusiones

El modelo CFD evaluado con datos experimentales, mostró mejor predicción en temperatura que en amoniaco, debido a las consideraciones de una fuente de emisión constante de amoniaco en todo el colector.

Se estudiaron los efectos de incidencia del viento en 3 direcciones (0° , 45° y 90° respecto al eje z), sobre la concentración de amoniaco y temperatura del aire al interior de la granja, donde se encontró que el la dirección del viento más favorable es a 45° , con concentraciones de 9 a 11 ppm en la ZOA.

Con una dirección del viento a 0° respecto al eje z, se obtuvo en los perfiles verticales temperaturas bajas del aire en comparación con las otras direcciones del viento, no obstante, el amoniaco presenta acumulación en la zona posterior de la instalación (20 a 24 m en el eje z de la granja).

Con una dirección del viento a 90° respecto al eje z se obtuvo una distribución homogénea en temperatura y concentración de amoniaco en la ZOA.

4.5. Literatura citada

- Beurskens, A. G. C., & Hol, J. M. G. (2004). Onderzoek naar de ammoniak- en geuremissie van stallen LXI: Stal voor vleeskalveren (witvlees productie). En *Agrotechnology & Food Innovations B.V.*
- Biswas, R., & Strawn, R. C. (1998). Tetrahedral and hexahedral mesh adaptation for CFD problems. *Applied Numerical Mathematics*, 26(1–2), 135–151. [https://doi.org/10.1016/S0168-9274\(97\)00092-5](https://doi.org/10.1016/S0168-9274(97)00092-5)
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., & Morsing, S. (2000). The effects of pen partitions and thermal pig simulators on airflow in a livestock test room. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(3), 317–326. <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0596>
- Bjerg, B., Rong, L., & Zhang, G. (2018). Computational prediction of the effective temperature in the lying area of pig pens. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.016>
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S., & Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*, 100(1), 105–116. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.004>
- Bodnar, K., Makra, L., Bodnar, G., & Privoczki Z., I. (2019). A review on environmental management of rabbit production. *Agricultural Management/Lucrari Stiintifice Seria I, Management Agricol*, XXI(1), 5–12.
- Calvet, S., Cambra-López, M., Estellés, F., & Torres, A. G. (2011). Characterization of the indoor environment and gas emissions in rabbit farms. *World Rabbit Science*, 19(1), 49–61. <https://doi.org/10.4995/wrs.2011.802>
- Calvet, S., Campelo, J. C., Estellés, F., Perles, A., Mercado, R., & Serrano, J. J. (2014). Suitability evaluation of multipoint simultaneous CO₂ sampling wireless sensors for livestock buildings. *Sensors (Switzerland)*, 14(6), 10479–10496. <https://doi.org/10.3390/s140610479>
- COLPOS. (2019). Normales climatológicas. Consultado el 12 de febrero de 2019 en <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/repor2/nrm15c.htm>
- Drewry, J. L., Choi, C. Y., Powell, J. M., & Luck, B. D. (2018). Computational model of methane and ammonia emissions from dairy barns: Development and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.012>

- Du, L., Yang, C., Dominy, R., Yang, L., Hu, C., Du, H., et al. (2019). Computational fluid dynamics aided investigation and optimization of a tunnel-ventilated poultry house in China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 159(7), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.02.020>
- Fidaros, D., Baxevanou, C., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Numerical study of mechanically ventilated broiler house equipped with evaporative pads. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.016>
- Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Ojeda, W., & Ruíz-García, A. (2017). Thermal and ammonia concentration gradients in a rabbit barn with two ventilation system designs. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 21(2), 134–140. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p134-140>
- Gebremedhin, K. G., Wu, B., & Perano, K. (2016). Modeling conductive cooling for thermally stressed dairy cows. *Journal of Thermal Biology*, 56, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2016.01.004>
- Jáuregui, E., & Vidal, J. (1990). Investigaciones geográficas: boletín del Instituto de Geografía. *Investigaciones geográficas*. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111981000100002
- Jin, N., Zheng, M., Chen, J., Duan, E., Kong, D., Wang, H., et al. (2018). Study on the indoor environmental simulation and optimal design of rabbit houses in winter based on CFD. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2018, 1. <https://doi.org/10.13031/aim.201800350>
- Krupa, S. . (2003). Effects of atmospheric ammonia (NH₃) on terrestrial vegetation: a review. *Environmental Pollution*, 124(2), 179–221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00434-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00434-7)
- Kwon, K. S., Lee, I. B., & Ha, T. (2016). Identification of key factors for dust generation in a nursery pig house and evaluation of dust reduction efficiency using a CFD technique. *Biosystems Engineering*, 151, 28–52. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.020>
- Li, H., Rong, L., & Zhang, G. (2018). Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 90–100. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.013>
- Li, H., Rong, L., Zong, C., & Zhang, G. (2017). Assessing response surface methodology for modelling air distribution in an experimental pig room to improve air inlet design based on computational fluid dynamics. *Computers*

and Electronics in Agriculture, 141, 292–301.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.009>

- Marai, I. F., Habeeb, A. A. ., & Gad, A. . (2002). Rabbits' productive, reproductive and physiological performance traits as affected by heat stress: a review. *Livestock Production Science*, 78(2), 71–90. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(02\)00091-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(02)00091-X)
- Marai, I. F. M., Ayyat, M. S., & Abd El-Monem, U. M. (2001). Growth performance and reproductive traits at first parity of New Zealand White female rabbits as affected by heat stress and its alleviation under Egyptian conditions. *Tropical Animal Health and Production*, 33(6), 451–462.
<https://doi.org/10.1023/A:1012772311177>
- Mondaca, M. R., Choi, C. Y., & Cook, N. B. (2019). Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: examination using computational fluid dynamics and experimental validation. *Biosystems Engineering*, 183, 70–84.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.04.014>
- Ngwabie, N. M., Jeppsson, K. H., Nimmermark, S., Swensson, C., & Gustafsson, G. (2009). Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. *Biosystems Engineering*, 103(1), 68–77.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.004>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2009). Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 103(1), 78–99. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.02.007>
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R., & Sun, D. W. (2010). Improving the representation of thermal boundary conditions of livestock during CFD modelling of the indoor environment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 73(1), 17–36.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.04.002>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 136(0), 25–38.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.05.004>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y. (2016). Computational modelling of thermal and humidity gradients for a naturally ventilated poultry house. *Biosystems Engineering*, 151, 273–285.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.012>
- Rojano, F., Bournet, P. E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M., & Choi, C. Y.

- (2019). Modelling the impact of air discharges caused by natural ventilation in a poultry house. *Biosystems Engineering*, 180(2013), 168–181. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.02.001>
- Rojano, F., Mondaca, M. R., & Choi, C. Y. (2013). Feasibility of a dual cooling system for dairy cows in Arizona. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2011, 7004(11). <https://doi.org/10.13031/2013.38149>
- Rong, L., & Aarnink, A. J. A. (2019). Development of ammonia mass transfer coefficient models for the atmosphere above two types of the slatted floors in a pig house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 183, 13–25. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.04.011>
- Rong, L., Bjerg, B., & Zhang, G. (2015). Assessment of modeling slatted floor as porous medium for prediction of ammonia emissions - Scaled pig barns. *Computers and Electronics in Agriculture*, 117, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.007>
- Tong, X., Hong, S. W., & Zhao, L. (2019). CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162(January), 281–299. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.03.031>
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007). An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. *Pearson Education Ltd*.
- Wu, W., Zhai, J., Zhang, G., & Nielsen, P. V. (2012). Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD). *Atmospheric Environment*, 63, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.09.042>