

<https://doi.org/10.5016/1984-5529.2023.v51.1433>

Fluctuación de dióxido de carbono en cuatro diferentes sistemas de producción pecuaria y una zona urbana de Paraguay medidos con tecnología "smart IoT"

Fluctuation of carbon dioxide in four different livestock production systems and an urban area of Paraguay measured with "smart IoT" technology

Roberto MARTÍNEZ-LÓPEZ ¹; Pedro Manuel ERRECART ²; Liz Mariela CENTURIÓN ³

¹ Autor de Correspondencia: Doctor en Zootecnia, Universidad Federal Rural de Pernambuco, Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas de la Universidad Nacional de Asunción, Dr. Gaspar Villamayor c/ Dr. Cecilio Báez, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguay, robertomartinezlo@vet.una.py

² Doctor en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar de Plata, errecart.pedro@inta.gob.ar

³ Licenciada en Estadística, Universidad Nacional de Asunción, lizmcinsa@gmail.com.

Recebido em: 09-09-2022; Aceito em: 27-01-2023

Abstract

Carbon Dioxide (CO₂) is one of the most important gases considered pollutants. For this reason, the generation of information that contributes to the characterization of the environmental footprint generated in urban areas and in representative animal production systems is a priority. Thus, the objective was to compare the fluctuation of the existing CO₂ level at man height, in an urban/capital area and in four typical Paraguayan models of animal production: intensive and semi-intensive dairy cattle, broiler chickens (intensive fattening) and rearing/rearing/fattening of pigs (intensive), globally and stratified into time slots. To do this, "IoT" (Internet of Things) technology was used, from a Smart Environment Libelilum[®] device, which obtained CO₂ readings and meteorological variables, transmitting them in real time to a digital platform. Globally, the highest average of parts per million (ppm) of CO₂ was observed in the broiler chicken system (512.77 ppm), followed by the urban area (372.94 ppm) and in last position, the shed of semi-intensive bovine production (296.36 ppm), detecting significant differences between groups ($p < 0.05$). The same behavior was found in the time slots; except in some intervals (from 00:00 to 06:00 and from 18:00 to 00:00; $p > 0.05$). The concentration of CO₂ in the air measured in the environment of bovine, pig and broiler milk production systems showed generally low values, which in most cases even compared favorably with that measured outdoors in the environment urban.

Additional keywords: pollutants; electronics devices; livestock; gases.

Resumen

El dióxido de carbono (CO₂) se constituye en uno de los gases más importantes considerados contaminantes. Por ello, es prioritaria la generación de información que contribuya en la caracterización de la huella medioambiental generada en área urbana y en sistemas de producción animal representativos. Así, el objetivo fue comparar a altura hombre la fluctuación del nivel de CO₂ existente, en una zona urbana/capitalina y en cuatro modelos típicos paraguayos de producción animal: bovina de leche intensivo y semi-intensivo, pollos parrilleros (engorde intensivo) y cría/recría/engorde de porcinos (intensivo), de manera global y estratificada en franjas horarias. Para ello, se utilizó la tecnología "IoT" (Internet of Things), desde un equipo Smart Environment Libelilum[®], que obtenía lecturas del CO₂ y variables meteorológicas, transmitiéndolos en tiempo real a una plataforma digital. De manera global, el mayor promedio de partes por millón (ppm) de CO₂ se observó en el sistema de pollos parrilleros (512,77 ppm), seguido de la zona urbana (372,94 ppm) y en última posición, se situó el galpón de producción bovina semi-intensivo (296,36 ppm), detectándose diferencias significativas entre los grupos ($p < 0,05$). Mismo comportamiento se constató en las franjas horarias; excepto en algunos intervalos (de 00:00 a 06:00 y de 18:00 a 00:00 horas; $p > 0,05$). La concentración de CO₂ en el aire medida en el ambiente de sistemas de producción de leche bovina, de cerdos y de pollos parrilleros mostró valores en general bajos, que en la mayoría de los casos incluso compararon favorablemente con aquella medida al aire libre en el ambiente urbano.

Palavras-chave adicionais: contaminantes; dispositivos eletrônicos; ganadería; gases.

Introducción

En las últimas décadas, se ha incrementado el debate sobre los gases contaminantes de la atmósfera terrestre, su origen, composición, efecto, dinámica, etc. Entre estos gases, los denominados de “Efecto Invernadero” (GEI), constituyen el centro de la discusión; donde el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄) son los 3 elementales, cuando el abordaje se posiciona desde lo “generado” por el sector agropecuario. En esta temática sensible, se encuentran teorías ideológicas, posiciones dicotómicas, datos contrapuestos, sustentos filosóficos, ambigüedad de criterios, análisis subjetivos, etc.; pero lo más importante es la imperiosa necesidad de producir alimentos de origen animal y vegetal, de manera sostenida, pero en armonía con el ambiente. En la misma línea, la economía circular es un concepto que crece exponencialmente, en actualidad y trascendencia, donde se pretende optimizar todos los recursos utilizados y los excedentes generados, en la producción de un bien (Arroyo, 2018), también aplicado al ámbito agrario. Pero para sostener un debate argumentado e impulsar programas estratégicos, en este menester, se necesitan datos obtenidos con rigor metodológico, utilizando tecnologías de avanzada y analizados con inferencias estadísticas apropiadas. Por ello, la medición de GEI emanados, captados, fluctuantes y/o concentrados en el aire, en ambientes de producción de distintas especies zootécnicas, es una prioridad en países latinoamericanos, con el objeto de caminar hacia la soberanía de informaciones, datos, conocimientos y decisiones autóctonas, además de contribuir a la definición de técnicas, métodos, sistemas y estrategias de producción menos contaminantes y más eficientes. Paraguay, no es la excepción.

Entre las metas relevantes promulgadas en el Acuerdo Internacional de París (UNFCCC, 2015), se encuentran las necesidades de establecer objetivos nacionales para reducir emisiones, revisando las contribuciones de cada país cada cinco años y buscando mecanismos para mitigar los daños causados. En este sentido, se replican los cuestionamientos realizados por Martínez-López & Acosta-Rodríguez (2021) ¿Deben los países sudamericanos cuya economía se basa en la producción agrícola, reducir las emisiones de GEI? ¿Debe la producción animal, indispensablemente, llevar a cabo planes de mitigación? ¿Cuánto GEI realmente emanan o fluctúan en los sistemas ganaderos paraguayos? ¿Existe diferencia entre el área urbana y los sistemas de producción pecuaria en los países?

El CO₂, sin dudas es uno de los gases considerados de mayor gravitación, cuando se habla de elementos circulantes en actividades ganaderas. Por tanto, debería existir una correspondencia entre CO₂ emanado/captado, libre, fluctuante y/o concentrado en atmósferas de sistemas pecuarios. Así también, urge la necesidad de obtener informaciones con rigor científico

sobre datos de emanación y/o fluctuación de GEI generados desde sistemas de producción, principalmente, en los rubros pecuarios más importantes del Paraguay (bovinos, porcinos y aves), para luego contrastarlos con circulantes referenciados en áreas urbanas, en un abordaje con aristas diferentes y enriquecedores; incluyendo modelos intensivos y semi-intensivos, que serían los más cuestionados en esferas de debate internacional.

Por otro lado, en la actualidad existen empresas multinacionales que han desarrollado tecnologías de avanzada para la medición de GEI, que de manera gradual van siendo aplicadas en el campo agrícola, en el proceso de obtención de datos con precisión, registrando centenares de lecturas al día, con observación remota y en tiempo real. Entre estas corporaciones, se encuentran las que integraron estratégicamente distintos dispositivos electrónicos en un solo equipo, que es el denominado “Smart Environment”, que cumple con las características citadas, midiendo variables meteorológicas y diversos gases de interés. Este modelo de trabajo, registro y transmisión de datos con altos niveles de precisión, está íntimamente ligado a la utilización efectiva de la estrategia del Internet de las Cosas (IoT), que según Zang et al. (2020), presenta amplia aplicación a diferentes campos de investigación, debido al soporte fundamental que otorga al proceso de colecta de datos, sistematización y envío de información con relativa seguridad, con buenos niveles de exactitud, razón poderosa que lo convierte en una herramienta para realizar investigación especializada.

En este estudio, se reúnen todos los puntos expuestos previamente, de manera a colocar un método de análisis utilizando estrategia “IoT” para medir CO₂, junto a temperatura, humedad y presión atmosférica, en fincas de producción bovina de leche (intensiva y semi-intensiva), de cría/engorde de cerdos y de pollos parrilleros, en áreas cercanas a la capital del Paraguay, y compararlas con el nivel de dicho gas, circulante en una calle de Asunción. Se interpreta que los valores de CO₂, registrados a altura hombre desde el equipo “Smart”, son consecuencia de las emisiones del citado gas, en el entorno específico definido (finca lechera, de Pollo, de Cerdo y calle urbana), aunque se entienda su posible subjetividad.

De esta forma, se ofrece un abordaje distinto para contribuir al enriquecimiento del debate sobre el tema introducido, atendiendo que anteriores estudios, han demostrado su utilidad, practicidad y el rigor de este tipo de metodologías, para generar principalmente niveles de CO₂ en atmósferas locales, desde sistemas de producción bovina para leche en modelos intensivos y semi-intensivos (Martínez-López & Acosta-Rodríguez, 2021), lo que, desde este trabajo, se pretende ampliarlo y profundizarlo. En términos conceptuales, se aclara que las fluctuaciones no son iguales a las emisiones, pero se interpreta que estos niveles de CO₂, son producto de lo generado en el medio de estudio propuesto, donde se procedió al

registro de los datos analizados. Se destaca y valora esta metodología de medición "GEI", puesto que, al no ser invasiva, favorece el contexto puntual del bienestar animal -lo cual se defiende-, y además, de acuerdo a Salinas et al. (2022), el "IoT" es una estrategia que está transformando rápidamente las industrias, la producción, las comunidades y la vida cotidiana; permitiendo avanzar veloz y efectivamente en varios campos de trabajo y áreas de pesquias.

Materiales y métodos

Área de estudio

El trabajo fue realizado entre los años 2020 y 2021, en el barrio Villa Morra de Asunción (latitud: 25° 17' 18,5" S y longitud: 57° 34' 60" O) del Paraguay y, en cuatro fincas pecuarias correspondientes a la producción bovina para leche (intensivo -1- y semi-intensivo -2-), pollos parrilleros (-3- engorde intensivo) y producción porcina (-4- cría/recría/engorde), todos, cercanos a la capital del país.

En ese contexto, primeramente, se describen, aquellas que fueron consideradas dos fincas lecheras en los departamentos de Central (latitud: 25° 29' 46" S y longitud: 57° 26' 10" O) y Cordillera (latitud: 25° 18' 30" S y longitud: 57° 10' 23" O), ubicados en la región oriental del país, a unos 40 kilómetros (km) de la capital, Asunción, en un mismo sistema agroecológico. Una de las fincas fue clasificada como Intensiva (1) de Producción de leche, debido a criterios locales predominantes para su categorización, tales como: conformado por 45 vacas (*Bos taurus*) lecheras con alta pureza racial Holstein en 300 m², con 2 ordeños diarios, auxiliados por 2 ha de pasto *Brachiaria* sp, con área de 20 ha de pasto de corte suministrado en sus comederos (*Penisetum purpureum*), suplementados con balanceado comercial (30% proteína bruta y 65% nutrientes digestibles totales-NDT-), ambos de forma *ad libitum*, con desplazamientos locomotivos reducidos (en 2 ha de pasto). La segunda finca, categorizada como Semi-intensiva (2), con 32 vacas de pureza racial variada, pero con predominancia de la raza Holstein, en 700 m² de galpón, que pastoreaban en buena parte del día en potreros de 4 has con *Brachiaria* sp, con racionamiento de balanceado comercial (30% proteína bruta y 65% NDT) y suministro de pasto de corte (*Penisetum purpureum*), ambos, solamente al momento de los dos ordeños diarios.

En cuanto a la producción de pollos parrilleros (3 engorde intensivo), el trabajo fue llevado a cabo en una granja avícola especializada para el efecto, ubicada en el municipio de Nueva Italia (latitud: 25° 39' 07" S y longitud: 57° 27' 27" O), Departamento Central, a escasos 30 km de Asunción. La propiedad tiene una superficie de 16 ha, casi toda de carácter boscosa, nivel alto y maderable. La misma cuenta con cinco (5) galpones de sistema presión negativa, totalmente automatizados, con generadores eléctricos y de capacidad entre 18.500 y 20.000 pollos adultos por cada nave (30 m por 75 m). La genética utilizada en

esta finca, es de la raza sintética Ross distribuida homogéneamente por la empresa que compra, faena y comercializa los pollos. Al momento del estudio, los animales se encontraban en fase adulta (tres semanas y media de edad), considerando que estos animales salen para faena en frigorífico, a los 38 días en promedio. Se trabajó a galpón completo durante la medición para el estudio (2.250 m² para 19.000 pollos). La alimentación con balaceado comercial suministrado por la empresa comercializadora, es a tiempo completo, igual que la disponibilidad de agua potable, con sistemas de recarga automáticas instantáneas. El control interno de luz, temperatura, humedad y otras necesidades, es por tableros electrónicos.

En lo concerniente a la producción porcina (-4- cría/recría/engorde intensivo), fue considerada una granja localizada entre las ciudades de Atyra y San Bernardino del Departamento de Cordillera, situado a unos 35 km de la capital (latitud: 25° 23' 17" S y longitud: 57° 13' 01" O). Los porcinos de razas híbridas P76 Landrace y Yorkshire, con un total de 20 hembras y 4 reproductores, son criados en áreas cerradas de movimientos, absolutamente controlados. En cuanto al programa de nutrición, estos animales reciben alimentación dos (2) veces al día en el horario de 07:00 horas (h) de la mañana y 17:00 h de la tarde, cuya mezcla se constituye de expeler de soja, maíz en grano y núcleo comercial (preparado de fábrica). La infraestructura en sí de la granja es bastante completa (luz eléctrica, agua en cantidad y calidad, además, cada corral posee sus propios comederos y bebederos) donde se mantiene la limpieza por sistemas de drenajes con inclinación y rejillas para el efecto, con un rústico modelo de tratamiento de efluentes. Estos sistemas de producción porcina, son típicos en la zona, caracterizados como de pequeña escala. En líneas generales, todos los cuatros modelos productivos incluidos en esta investigación, son cercanos a la capital en distancia, bajo el mismo sistema agroecológico y climatológico aledaño, y categorizados como de mediana escala, lo cual es frecuente en la zona.

Medición de variables

Para el relevamiento de datos fue utilizada la estrategia del "Internet de las cosas" (IoT, por sus siglas en inglés - Internet of Things), mencionado por Pérez et al. (2019), la cual integra varias tecnologías de avanzadas para la medición de gases considerados contaminante del ambiente, pero que, para este trabajo en particular, fue tenido en cuenta solamente y con especial atención al CO₂ fluctuante a altura hombre, cuya unidad de medida establecida fue en partes por millón (ppm). Igualmente, se registraron las variables meteorológicas: Presión Atmosférica (hPa), Humedad Relativa (%) y Temperatura (Grados Celsius °C). Específicamente se empleó el equipo "Smart Environment Libelium[®]", integrando al menos siete tecnologías distintas: 1) La electrónica de Plug & Sense[®], línea moderna de dispositivos con sensores

inalámbricos encapsulados que permite a los integradores de sistemas implementar de internet “wireless” modulares y escalables; 2) El Waspnote®, plataforma modular electrónica “open source” que sirve para construir redes de sensores inalámbricas de muy bajo consumo, que está conformada a su vez por microcontroladores, memorias, baterías, acelerómetro y sockets para añadir módulos de programación; 3) Libelium®, encargada de fabricar las carcasas tecnológicas a prueba de agua y golpes “Smart”, para ensamblar tecnologías de mediciones y control de parámetros ambientales y gases fluctuantes; 4) Convergía®, plataforma multinacional en modo de nubes (cloud computer) que genera conectividad virtual de datos generados por el equipo, en tiempo real, de enlace *in situ*-remoto; 5) El Router de marca registrada y comercializada como TP-Link Technologies CO®, de modelo TL-MR3420, fabricado en China para contribuir a la captación del internet; 6) Módem Huawei®, dispositivo móvil ultraliviano de puerto Universal Serial Bus (USB), que conectado a un puerto referenciado, junto a un Router liberado, puede enlazar señal de internet Wi-Fi en cualquier lugar gracias a una tarjeta SIM local; 7) SIM-CARD (Subscriber identity module), módulo de identificación del abonado, que constituye una tarjeta inteligente desmontable usada por teléfonos móviles y módems HSPA o LTE que se conectan al dispositivo por medio de una ranura lectora SIM (abonada a una telefónica móvil local, con servicio 3G). Es importante mencionar que, el equipo fue configurado para realizar una lectura de cada variable meteorológica y de CO₂, cada 400 segundos o 6,5 minutos, alcanzando así, unos 210 datos (± 20) por día, transmitido de forma remota mediante la plataforma de la corporación y almacenado siempre en tiempo real de modo automático. Estos equipos son considerados actualmente de alta generación, implementados como estrategia innovadora en el sector agropecuario a nivel de fincas de avanzada, en Europa principalmente, y con aplicación a varios campos productivos, industriales y corporativos, además de la vida rutinaria del ser humano, con fiabilidad y seguridad reconocida por expertos en el ámbito de la electrónica moderna.

Análisis estadísticos

A efectos de identificar el patrón de comportamiento de los datos, específicamente la distribución teórica; se empleó primeramente el test de Kolmogorov – Smirnov (Martínez-López, 2017). Asimismo, se determinaron algunas estadísticas descriptivas. Posteriormente, una vez detectada mediante el test de normalidad que se ajustaban a un patrón de comportamiento no paramétrico, se procedió al análisis de la posible asociación existente entre las variables en estudio, mediante el empleo del coeficiente de correlación de Spearman (Siegel & Castellan, 1995). Finalmente, se aplicó el análisis de varianza basado en procedimientos de permutación (Anderson, 2001, Anderson & Millar, 2004, Alberton et al., 2020), para comparar la fluctuación del CO₂ de manera global y en

cada franja horaria, descritas así: 00:00 a 06:00 h; 06:00 a 12:00 h; 12:00 a 18:00 h y de 18:00 a 00:00 h. Todos los análisis fueron materializados a través del software estadístico R Project for Statistical Computing (R Core Team, 2020).

Resultados y discusión

En la Figura 1 se presentan los niveles de CO₂ obtenidos en el estudio, a través del gráfico exponiendo valores medios y de desvío estándar. Estos resultados comprenden los promedios globales observados en las fincas concernientes a la producción bovina de leche (intensivo y semi-intensivo), cría/engorde porcino, pollos parrilleros, además del punto de relevamiento ubicado en un barrio céntrico de la ciudad de Asunción, con buena circulación vehicular.

Como primera observación sobre el gráfico, se visualiza al mayor promedio de CO₂ registrado en el sistema de producción de pollos parrilleros (512,77 ppm), seguido del punto de medición ubicada en la zona céntrica considerada (372,94 ppm), luego la finca lechera intensiva (350,43 ppm), el establecimiento de producción porcina (326,01 ppm) y en última posición, se situó el nivel observado en el galpón bovina en el modelo semi-intensivo (296,36 ppm), detectándose diferencias estadísticas significativas entre todos los grupos de comparación (Figura 1; $p < 0,05$), lo que indica a pensar que la fuente de variación que origina estos datos, proviene de la causalidad analizada.

Atendiendo publicaciones recientes, el valor medio global de concentración de CO₂ en el aire para 2021 fue reportado en 414 ppm (Friedlingstein et al., 2022), valor que resulta superior al observado en todos los ambientes estudiados en este trabajo con excepción de los galpones de pollos parrilleros. La mayor concentración de CO₂ en el aire registrada en el sistema de producción avícola analizado, podría explicarse desde el modelo de presión negativa en que operan los galpones de crecimiento de pollos incluidos en el estudio, el cual ofrece mayor restricción al movimiento libre del aire que los sistemas de producción lechera o de cerdos. De todos modos, esta mayor concentración de CO₂ observada en los galpones de pollos parrilleros se encontró bien por debajo de los valores umbrales a partir de los cuales la producción animal comienza a verse resentida (Reece & Lott, 1980). La concentración de CO₂ observada en tres de los cuatro modelos confinados de producción animal evaluados, fue además inferior a la registrada al aire libre en una zona citadina. Los niveles de CO₂ en el aire medido en estas fincas de producción animal, típicos de regiones cercanas a la capital de Paraguay, pueden ser entonces catalogados como bajos de un modo general. De hecho, los niveles de CO₂ registrados en los sistemas bovinos fueron inferiores a los reportados para sistemas similares por Feddes et al. (1984), Kaasik & Maasikmets (2013), Vtoryi et al. (2016), Dimov et al. (2019), Zou et al. (2020) y D’Urso & Arcidiacono (2021). Las concentraciones de CO₂ observadas en el sistema

productivo de cerdos, por su parte, fueron menores a las observadas por Feddes et al. (1984), Donham & Pependorf (1985), Attwood et al. (1987), Ni et al. (2008), Bahhazi et al. (2011), Mihina et al. (2012), Vermeer & Hopster (2018) y Fernández et al. (2020). Por último, los niveles de CO₂ en el aire medidos en los galpones de pollos parrilleros fueron también inferiores a los valores reportados por Feddes et al. (1984), Jones et al. (1984), Maghirang et al. (1991) y Kocaman et al. (2006). Cabe resaltar, sin hacer juicio de valor exacto, se estima que

debería existir correspondencia entre las emisiones de CO₂ desde la producción animal en una finca en particular, con la concentración y fluctuación del mismo gas, a altura hora hombre, en el mismo lugar. En este trabajo, se analiza solo lo segundo expuesto.

En la Tabla 1 se exponen las medidas descriptivas para las variables medidas, según la franja horaria y el lugar del registro de la fluctuación de CO₂. Igualmente, los resultados del análisis inferencial realizado.

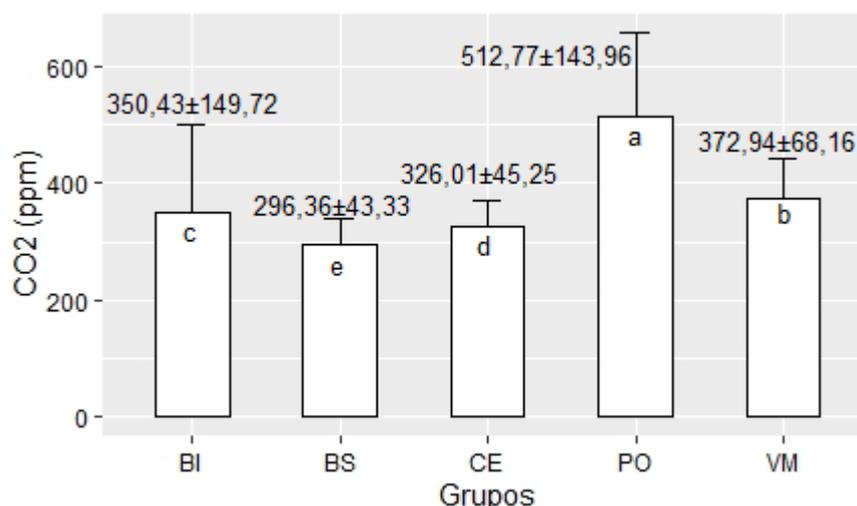


Figura 1 - Comparación de los valores promedio de CO₂ entre los grupos evaluados. Media ± Desvío estándar; BI: bovino sistema intensivo; BS: bovino sistema semi-intensivo; CE: cerdos; PO: pollos parrilleros; VM: zona urbana Villa Morra/Asunción; CO₂: dióxido de carbono; ppm: partes por millón. Letras distintas entre columnas indican diferencias significativas entre grupos ($p < 0,05$). *Comparison of the average values of CO₂ between the evaluated groups.*

Tabla 1 - Comparación de los niveles fluctuantes de CO₂ entre los grupos considerados, según franja horaria. *Comparison of the fluctuating levels of CO₂ between the groups considered, according to time slot.*

Franja Horaria (Horas)	CO ₂ ¹ (ppm)	² BI	³ BS	⁴ CE	⁵ PO	⁶ VM
De 00:00 a 06:00	Media	347,19 ^C	287,25 ^E	340,89 ^{CD}	543,22 ^A	394,8 ^B
	⁷ DE	145,65	26,75	54,73	128,51	66,52
	⁸ CV(%)	41,95	9,31	16,06	23,66	16,85
De 06:00 a 12:00	Media	348,34 ^C	313,11 ^E	320,56 ^D	526,05 ^A	401,93 ^B
	DE	149,92	69,91	38,37	143,42	73,02
	CV(%)	43,04	22,33	11,97	27,26	18,17
De 12:00 a 18:00	Media	355,88 ^B	294,13 ^E	313,97 ^D	490,99 ^A	334,35 ^C
	DE	154,92	31,15	34,06	131,51	43,51
	CV(%)	43,53	10,59	10,85	26,78	13,01
De 18:00 a 00:00	Media	350,52 ^B	290,7 ^E	328,67 ^D	492,85 ^A	349,57 ^{BC}
	DE	148,47	20,47	46,52	162,56	56,63
	CV(%)	42,36	7,04	14,15	32,98	16,2

¹ppm: partes por millón; ²BI: bovino sistema intensivo; ³BS: bovino sistema semi-intensivo; ⁴CE: cerdos; ⁵PO: pollos parrilleros; ⁶VM: zona urbana Villa Morra/Asunción; ⁷DE: desvío estándar; ⁸CV: coeficiente de variación. Letras distintas en una misma fila indican diferencias significativas entre grupos ($p < 0,05$), según la prueba de permutación

Se pudo evidenciar disimilitudes entre los distintos grupos de medición, cuando se verificaron los niveles de CO₂ fluctuantes, en las cuatro franjas horarias segmentadas por día (Tabla 1; $p < 0,05$);

excepto en los valores promedios constatados en el sistema de producción bovina de leche intensivo y en la zona urbana; específicamente durante la noche (18:00 a 00:00 h; $p > 0,05$) y, en el sistema de producción

bovina de leche intensivo y de cerdos (00:00 a 06:00 h; $p > 0,05$). Asimismo, los sistemas de producción animal evaluados mostraron menor variabilidad horaria en lo que respecta a la concentración de CO₂ en el aire ($\pm 1,5$ a 5,8% de la media diaria registrada) que los valores observados en el ámbito citadino (-12 a +8% de la media diaria).

Esta mayor variabilidad en la calidad del aire del ambiente citadino se explica por la alta fluctuación tanto en la intensidad del tránsito vehicular (alrededor de 50 automóviles por hora, en espacio matutino, vespertino y nocturno) como en las condiciones de estabilidad de la atmósfera que tienen lugar durante el día. La concentración de CO₂ en el aire suele ser mayor durante los horarios de mayor tránsito durante la mañana y al atardecer (*rush hours*), pero los valores

registrados durante la mañana a menudo son más importantes debido a las condiciones de mayor estabilidad de la atmósfera, poco favorables para el desarrollo de turbulencia y mezclado de las masas de aire (Stull, 1988). El argumento anteriormente expuesto explicaría el nivel pico observado durante horas de la mañana en este estudio, resultado que a su vez coincide con lo reportado en estudios similares (Lin et al., 2018).

En la Figura 2 se visualizan los coeficientes de correlación de Spearman entre las distintas variables meteorológicas, tales como: temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y los niveles fluctuantes de CO₂, en cada grupo de observación.

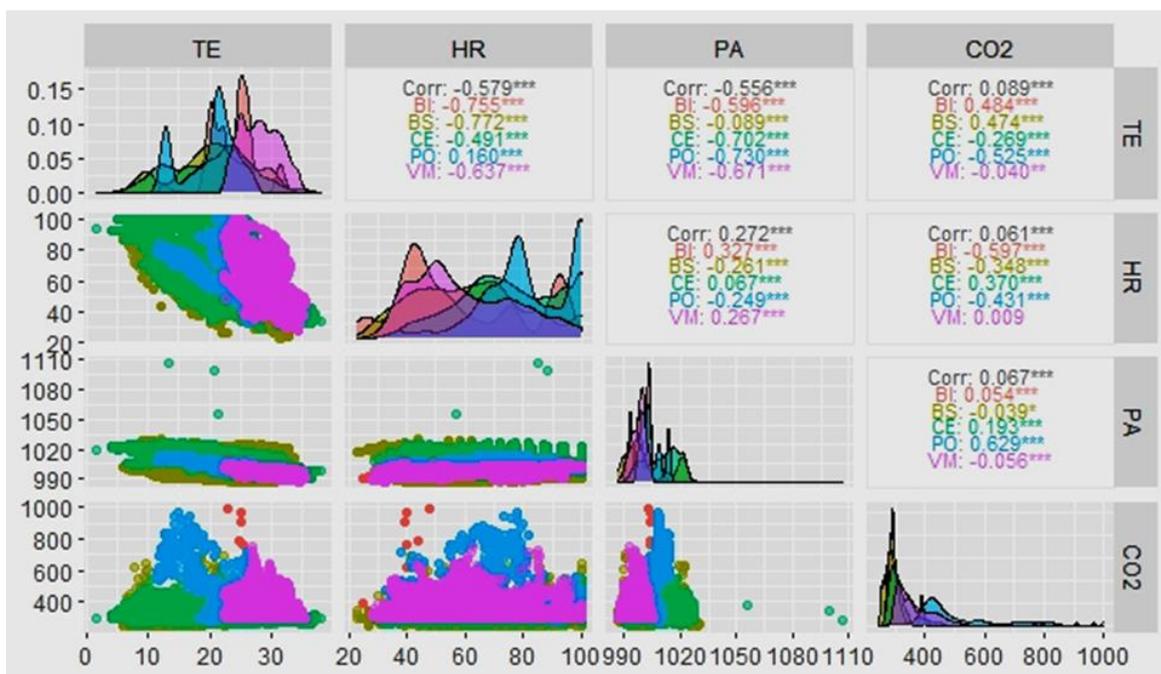


Figura 2 - Correlaciones de Spearman entre las distintas variables observadas en cada grupo de evaluación. Corr: correlación; BI: bovino sistema intensivo; BS: bovino sistema semi-intensivo; CE: cerdos; PO: pollos parrilleros; VM: Villa Morra/Asunción; CO₂: dióxido de carbono; ppm: partes por millón; TE: temperatura en grados Celsius; HR: humedad relativa en %; PA: presión atmosférica en hectopascal; ***La correlación es significativa a un nivel de probabilidad de 0,001; **La correlación es significativa al nivel 0,01; *La correlación es significativa al nivel 0,01. *Spearman correlations between the different variables observed in each evaluation group.*

Debido a la alta frecuencia de muestreo aplicada por los equipos empleados ($n > 8000$ por cada módulo), en casi todos los casos la concentración de CO₂ mostró correlaciones estadísticamente significativas con las variables meteorológicas cuantificadas. Desde los valores de coeficientes de correlación obtenidos en este trabajo, sin embargo, sugieren algún grado de asociación entre las variables, mostrando tan sólo de débil a moderada estrechez (Taylor, 1990). En el caso particular de la asociación entre [CO₂] y temperatura, esta suele ser fuerte cuando se contempla la variación espacial conjunta de ambas variables dentro del espacio de medición (Brannigan &

McQuitty, 1972). En este trabajo, en cambio, dicha asociación se evaluó contemplando la variabilidad temporal de ambas variables, y en tales condiciones la relación mostró un carácter más reducido y débil. En este sentido, los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Maghirang et al. (1991), Kocaman et al. (2006), Mihina et al. (2012) y Kaasik & Maasikmets (2013). Siempre puntualizando, que el aporte observado en este estudio, desemboca desde una nueva estrategia de medición de GEI en fincas de producción animal, en modelos típicos, utilizando tecnología de avanzada (ensamblaje de electrónicos con IoT), generando datos con rigor metodológico en

cuanto a concentración y fluctuación, a altura hombre en los sitios referidos, otorgando un arboraje distinto al análisis que es debate internacional, buscando así, enriquecer convenientemente la discusión sobre el asunto.

Conclusiones

La producción animal es reiteradamente señalada como una responsable significativa del fenómeno del cambio climático desde actividades antropogénicas. Por ello, es importante la obtención de información local que permita caracterizar la huella medioambiental generada por los modelos de producción animal típicos y más representativos de Paraguay, como lo son la producción bovina de leche, cría/engorde porcino y pollos parrilleros. Este trabajo aporta datos interesantes al respecto, específicamente con fluctuación de dióxido de carbono, medidos durante todo el día, y por varias semanas.

La concentración de dióxido de carbono en el aire fluctuante a altura hombre, medida en el ambiente de sistemas de producción de leche bovina, cría/engorde de cerdos y de pollos parrilleros, mostró valores en general bajos, que en la mayoría de los casos incluso inferiores cuando comparados con aquella medida al aire libre en el ambiente urbano de Asunción.

Las correlaciones entre el nivel de dióxido de carbono circulante y las variables meteorológicas del lugar, para todos los casos incluidos en el trabajo, mostraron frágil asociación, siempre, en el modelo de medición expuesto.

Estos resultados resultan prometedores, alientan el desarrollo y la aplicación sobre estos sistemas de producción animal, técnicas de cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero más avanzadas, como son los equipamientos electrónicos integrados en un "Smart" dinamizados por la tecnología "IoT", que permitan el desarrollo de factores de emisión locales para lograr así una mayor precisión al momento de calcular los inventarios nacionales de estos gases, además de datos obtenidos con rigor metodológico, para variantes de abordajes, contrastes y discusión sobre el asunto.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Nacional de Asunción (UNA), por ayudar a materializar el trabajo a través del programa PROCIENCIA, con recursos del Fondo para la Excelencia de la Educación e Investigación (FEEI). Igualmente, la gratitud a la Empresa Láctea "Súper Yo", al Rancho San Fernando, a las Granjas Doña Mercedes y Don Luis, por facilitar sus establecimientos para las mediciones expuestas y analizadas en esta investigación.

Referencias

Alberton BAV, Nichols TE, Gamba HR, Winkler AM (2020) Multiple testing correction over contrasts for brain imaging. *NeuroImage* 216:1-14. doi: 10.1016/j.neuroimage.2020.116760

Anderson MJ (2001) Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58(3):626-639. doi: <http://dx.doi.org/10.1139/f01-004>

Anderson MJ, Millar RB (2004) Spatial variation and effects of habitat on temperate reef fish assemblages in northeastern New Zealand. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 305(2):191-221. doi: 10.1016/j.jembe.2003.12.011

Arroyo FR (2018) The circular economy as a sustainable development factor of the productive sector. *Innova Research Journal* 3(12):78-98. doi: 10.33890/innova.v3.n12.2018.786

Attwood P, Brouwer R, Ruigewaard P, Versloot P, de Wit R, Heederik D, Boleij JS (1987) A study of the relationship between airborne contaminants and environmental factors in Dutch swine confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal* 48(8):745-751. doi: 10.1080/15298668791385507

Banhazi TM, Stott P, Rutley DL, Blanes-Vidal V, Pitchford WS (2011) Air exchanges and indoor carbon dioxide concentration in Australian pig buildings: effect of housing and management factors. *Biosystems Engineering* 110(3):272-279. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2011.08.007

Brannigan PG, McQuitty JB (1972) Concentration-temperature relationships of atmospheric gaseous contaminants. *Canadian Agricultural Engineering* 14(1):37-41.

Dimov D, Marinov I, Penev T, Miteva C, Gergovska Z (2019) Animal hygienic assessment of air carbon dioxide concentration in semi-open freestall barns for dairy cows. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 25(2):354-362.

Donham KJ, Popendorf WJ (1985) Ambient levels of selected gases inside swine confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal* 46(11):658-661. doi: 10.1080/15298668591395490

D'Urso PR, Arcidiacono C (2021) Effect of the Milking Frequency on the Concentrations of Ammonia and Greenhouse Gases within an Open Dairy Barn in Hot Climate Conditions. *Sustainability* 13(16):1-12. doi: 10.3390/su13169235

- Feddes JJR, Leonard JJ, Mcquitty JB (1984) Carbon dioxide concentration as a measure of air exchange in animal housing. *Canadian Agricultural Engineering* 26(1):53-56.
- Fernandez MD, Losada E, Ortega JA, Arango T, Ginzo-Villamayor MJ, Besteiro R, Lamosa S, Barrasa M, Rodriguez M (2020) Energy, production and environmental characteristics of a conventional weaned piglet farm in north west Spain. *Agronomy* 10(6):1-13. doi: 10.3390/agronomy10060902
- Friedlingstein P, Jones MW, O'Sullivan M, Andrew RM, Bakker DCE, Hauck J, Le Quéré C, Peters GP, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Canadell JG, Ciais P, Jackson RB, Alin SR, Anthoni P, Bates NR, Becker M, Bellouin N, Bopp L, Chau TTT, Chevallier F, Chini LP, Cronin M, Currie KI, Decharme B, Djeutchouang LM, Dou X, Evans W, Feely RA, Feng L, Gasser T, Gilfillan D, Gkritzalis T, Grassi G, Gregor L, Gruber N, Gürses Ö, Harris I, Houghton RA, Hurtt GC, Iida Y, Ilyina T, Luijckx IT, Jain A, Jones SD, Kato E, Kennedy D, Klein Goldewijk K, Knauer J, Korsbakken JI, Körtzinger A, Landschützer P, Lauvset SK, Lefèvre N, Lienert S, Liu J, Marland G, McGuire PC, Melton JR, Munro DR, Nabel JE, Nakaoka S-I, Niwa Y, Ono T, Pierrot D, Poulter B, Rehder G, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Rosan TM, Schwinger J, Schwingshackl C, Séférian R, Sutton AJ, Sweeney C, Tanhua T, Tans PP, Tian H, Tilbrook B, Tubiello F, van der Werf GR, Vuichard N, Wada C, Wanninkhof R, Watson AJ, Willis D, Wiltshire AJ, Yuan W, Yue C, Yue X, Zaehle S, Zeng J (2022) Global Carbon Budget 2021. *Earth System Science Data* 14(4):1917-2005. doi: 10.5194/essd-14-1917-2022
- Jones WG, Moring K, Olenchock S, Williams T, Hickey J (1984) Environmental study of poultry confinement buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal* 45(11):760-766. doi: 10.1080/15298668491400575
- Kaasik A, Maasikmets M (2013) Concentrations of airborne particulate matter, ammonia and carbon dioxide in large scale uninsulated loose housing cowsheds in Estonia. *Biosystems Engineering* 114(3):223-231 doi: 10.1016/j.biosystemseng.2013.01.002
- Kocaman B, Esenbuga N, Yildiz A, Laçın E, Macit M (2006) Effect of environmental conditions in poultry houses on the performance of laying hens. *International Journal of Poultry Science* 5(1):26-30. doi: 10.3923/ijps.2006.26.30
- Lin J, Mitchell L, Crosman E, Mendoza D, Buchert M, Bares R, Fasoli B, Bowling D, Pataki D, Catharine D, Strong C, Gurney K, Patarasuk R, Baasandorj M, Jacques A, Hoch S, Horel J, Ehleringer J (2018) CO₂ and carbon emissions from cities: linkages to air quality, socioeconomic activity and stakeholders in the Salt Lake City urban area. *Bulletin of the American Meteorological Society* 99 (11):2325-2339. doi:10.1175/BAMS-D-17-0037.1
- Maghirang RG, Manbeck HB, Roush WB, Muir FV (1991) Air contaminant distributions in a commercial laying house. *Transactions of the ASAE* 34(5):2171-2180. doi: 10.13031/2013.31855
- Martínez-López OR (2017) Métodos estadísticos aplicados en Zootecnia. Etigraf, Asunción. 292p.
- Martínez-López OR, Rodríguez-Acosta MI (2021) Estudio de las fluctuaciones de Metano (CH₄) y Dióxido de Carbono (CO₂), en dos galpones de producción bovina para leche de Paraguay (intensivo y semi-intensivo), utilizando tecnología "IoT". *Revista Científica De La Facultad De Ciencias Veterinarias De La Universidad Del Zulia* 31(3):99-106.
- Mihina Š, Sauter M, Palkovičová Z, Karandušovská I, Brouček J (2012) Concentration of harmful gases in poultry and pig houses. *Animal Science Papers and Reports* 30(4):395-406.
- Ni J-Q, Heber AH, Lim TT, Tao PC, Schmidt AM (2008) Methane and carbon dioxide emission from two swine finishing barns. *Journal of Environmental Quality* 37(6):2001-2011. doi: 10.2134/jeq2007.0386
- Pérez R, Narvajás S, Terry E (2019) IoT en ALC 2019: Tomando el pulso al Internet de las Cosas en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). doi: 10.18235/0001968
- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reece FN, Lott BD (1980) Effect of carbon dioxide on broiler chicken performance. *Poultry Science* 59(11):2400-2402. doi: 10.3382/ps.0592400
- Salinas YD, Galván DG, Guzmán I, Orrante JA (2022) El impacto del internet de todas las cosas (IoT) en la vida cotidiana. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar* 6(2):1369-1378. doi: 10.37811/clrcm.v6i2.1959
- Siegel S, Castellan NJ (1995) Medidas de Asociación no paramétricas. En: *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*, 4.ª ed., Trillas. pág.272-282.
- Stull RB (1988) An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer Dordrech. 670p.
- Taylor R (1990) Interpretation of the correlation coefficient: a basic review. *The Journal of Diagnostic*

Medical Sonography 6(1):35-39. doi:
10.1177/875647939000600106

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (2015) The Paris Agreement. Framework Convention on Climate Change. United Nations. Available at:
<<https://unfccc.int/resource/bigpicture/index.html#content-the-paris-agreement>> (Access on: Mar. 28, 2020).

Vermeer HM, Hopster H (2018) Operationalizing Principle-Based Standards for Animal Welfare-Indicators for Climate Problems in Pig Houses. *Animals (Basel)* 8(4):2-15. doi: 10.3390/ani8040044

Vtoryi V, Vtoryi S, Lantsova E, Gordeev V (2016) Effect of water conditions on content of carbon dioxide in barns. In: 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. p.437-441. Available at: <<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=LV2016030680>> (Access on: Mar. 10, 2022).

Zhang WE, Sheng Q, Mahmood A, Tran DH, Zaib M, Hamad S, Aljubairy A, Alhazmi A, Sagar S, Ma C (2020) The 10 Research Topics in the Internet of Things. In: IEEE 6th International Conference on Collaboration and Internet Computing. p.34-43. doi: 10.1109/CIC50333.2020.00015

Zou B, Shi Z, Du S (2020) Gases emissions estimation and analysis by using carbon dioxide balance method in natural-ventilated dairy cow barns. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 13(2):41-47. doi:10.25165/j.ijabe.20201302.4802