

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”

Study of the fluctuations of Methane (CH₄) and Carbon Dioxide (CO₂), in bovine production bars for milk from Paraguay, using “IoT” technology

Oscar Roberto Martínez-López^{1,2*}  y María Inés Rodríguez-Acosta² 

¹Centro Multidisciplinario de Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.

²Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional de Asunción. San Lorenzo, Paraguay.

*Correo Electrónico: robertomartinezlo@vet.una.py

RESUMEN

El trabajo fue realizado para analizar fluctuaciones de Dióxido de Carbono (CO₂) y Metano (CH₄) en modelos típicos paraguayos de producción bovina de leche, incluyendo dos “Sistemas” (intensivos vs semi-intensivos). El objetivo fue generar la primera base de datos reales del país, con lo cual, comenzar a dimensionarlo realmente y categorizarlos. La bovinocultura es un rubro socioeconómico sustancialmente importante del país, con ella, el sector lácteo es extremadamente relevante para cubrir el consumo nacional y exportación. Igualmente, se buscó discriminar por “Sistema” de producción, su inferencia en la fluctuación de CO₂ y CH₄. También, fragmentando el día en cuatro franjas horarias (Madrugada, Día, Tarde y Noche), se verificaban diferencias importantes en la emanación de estos gases de efecto invernadero (GEI). Para el fin, fue utilizado la tecnología “IoT” (internet of things), mediante un equipo Smart Environment Libelium, que generaba en tiempo real, una lectura de gases mencionados a cada 6 a 7 minutos y transmitidos a una plataforma digital, formando base de datos. Fueron analizados más de 8500 datos para cada gas, y paralelamente, temperatura, humedad y presión atmosférica. Se implementó el software estadístico R, para el análisis de los resultados. De manera global, el mayor promedio de partes por millón (ppm) de CO₂ por franja horaria se encontró en la mañana (06:00 a 12:00 horas). En cuanto a Sistemas, la mayor media de CO₂ fue evidenciada en el Intensivo. Los niveles de CH₄ (% LEL) fluctuantes en ambos galpones de producción bovina de leche, sin importar cualquier categoría, se mantuvieron por debajo del nivel de captación del sensor inteligente (70 ppm). Se detectó correlación positiva moderada entre los niveles de CO₂ y Temperatura (°C). Correlación negativa entre CO₂ y la humedad. Los niveles de CO₂ (ppm) fluctuantes en ambos galpones de producción bovina de leche, en Paraguay, sin importar las franjas horarias ni sistemas, pueden considerarse reducidos.

Palabras clave: Ganadería; láctea; tecnología; contaminantes; integrado

ABSTRACT

The work was carried out to record fluctuations in Carbon Dioxide (CO₂) and Methane (CH₄) in traditional Paraguayan dairy models, including two “Systems” (intensive vs semi-intensive). The objective was to generate the first real database in the Country, with which, to begin to really size it and categorize it. It was emphasized that bovine farming is a substantially important socio-economic area of the Country, with it, the dairy sector is extremely relevant to cover national consumption and exports. Likewise, it was sought to discriminate by production “System”, its inferred in the fluctuation of CO₂ and CH₄. Also, fragmenting the day into four time bands (Early Morning, Day, Afternoon and Night), if they verified important differences in the emanation of these greenhouse gases GHGs. For the purpose, the “IoT” (internet of things) technology was used, by means of a Smart Environment Libelium equipment, which generated in real time, a reading of gases mentioned every 6 to 7 minutes and transmitted to a digital platform, forming the basis of data. More than 8,500 data were analyzed for each gas and parallel to temperature, humidity and atmospheric pressure. Statistical software R was implemented for the analysis of the results. Overall, the highest average parts per million (ppm) CO₂ by time zone was found in the morning (06:00 to 12:00). Regarding Systems, the highest mean CO₂ was evidenced in the Intensive. The fluctuating CH₄ (% LEL) levels in both bovine milk production sheds, regardless of category, remained below the smart sensor uptake level (70 ppm). A moderate positive correlation was detected between levels of CO₂ and temperature (°C). Negative correlation between CO₂ and humidity. The fluctuating levels of CO₂ (ppm) in both dairy systems, in Paraguay, regardless of time bands or systems, can be considered low.

Key words: Livestock; milky; technology; polluting; integrated

INTRODUCCIÓN

La medición de gases conocidos como de efecto invernadero (GEI) en sistemas ganaderos (SG) es una prioridad en países de América Latina, a fin de constituir inventarios nacionales propios y no formar parte de planes de mitigación realizados desde cálculos estimados en otras regiones o países industrializados del mundo. Paraguay no es la excepción. Algunas de las principales metas consensuadas en el Acuerdo Internacional de París (2015) [25], están centradas en establecer objetivos nacionales para reducir las emisiones, revisando las contribuciones de cada país cada cinco años (a) y buscar mecanismos para mitigar los daños causados por el cambio climático. Pero la pregunta debería ser; ¿Los países sudamericanos deben trabajar en la reducción de emisiones de GEI? ¿La ganadería debe indefectiblemente implementar planes de mitigación? Seguidamente, ¿Cuánto GEI realmente emanan los SG paraguayos? En este caso, se enfoca en la producción bovina para leche (PBL), que constituye una de las mayores fuentes de proteína con alto valor biológico, además de conformar el “combo” principal de la soberanía alimentaria del país. Por tanto, se considera de gran relevancia generar datos reales sobre emanación y fluctuación de GEI desde SG, para defender la soberanía productiva.

Entre los GEI, el Metano (CH₄) y Dióxido de Carbono (CO₂) conforman dos de los gases más importantes considerados contaminantes, que son emanados desde las ganaderías. La PBL, no es la excepción. Es urgente la generación de informaciones con rigor científico, sobre datos de emanación de CO₂ y de CH₄ producidos en rubros pecuarios. Al menos, en sistemas semi-intensivos a intensivos, que son los más cuestionados a nivel internacional, y los más simples en términos logísticos para medir, en comparación a sistemas abiertos, libres o extensivos.

El origen y desarrollo del “Internet de las Cosas” (IoT, por sus siglas en inglés), se dio en las décadas del 2000, donde Kevin Ashton, quien trabajaba para el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) AutoID laboratorio, fue uno de los pioneros de esta idea, buscando soluciones tecnológicas a problemas de ámbitos multidisciplinarios y rutinarios. El concepto fue simple: Si todos los objetos de la vida cotidiana estuvieran equipados con identificadores y conectividad inalámbrica, éstos podrían comunicarse entre sí y, ser gestionados por las computadoras [18].

El progreso desde ahí, al día (d) de hoy, fue grande. Actualmente, muchas empresas electrónicas multinacionales de avanzada están desarrollando “bajo receta” soluciones tecnológicas. Un par de ellas, son las empresas Convergía y Libelium, quienes integraron varias tecnologías en un solo equipamiento: el “Smart Environment”, que constituye un equipamiento con capacidad de medir en tiempo real y de manera remota, cualquier tipo de gases y factores climáticos. ¿Soluciones tecnológicas de alto impacto en ganadería, para generar datos reales de fluctuación de GEI en ganadería? El desafío fue establecido, implementado y ejecutado. En este trabajo se ven los primeros resultados que son bastante alentadores, cuando se razona en función a las dudas lanzadas anteriormente: Realmente los SG paraguayos, ¿son tan contaminantes? Este eje, se constituyó en el objetivo fundamental de este trabajo, sentado en dos sistemas de PBL, típica en la actualidad en el Paraguay, de manera a formar la primera base de datos reales sobre CO₂ y CH₄ fluctuantes en sistemas lácteos del país.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue realizado durante el primer semestre del a 2020, en dos fincas lecheras típicas de la zona de la región oriental de Paraguay, especialmente, en la zona de los departamentos Central y Cordillera, a unos 40 kilómetros (km) de la capital, Asunción. La primera fue categorizada como Finca Intensiva de Producción de leche, debido a criterios locales, fundados en: 45 vacas (*Bos taurus*) lecheras con alta pureza racial Holstein mantenidos en 2 hectáreas (has) de pasto, y manejados en 300 metros cuadrados (m²) de galpón de ordeño, donde el desplazamiento es prácticamente nulo, alimentados con balanceados comerciales y pastos demolidos de corte, *ad libitum*, para ordeño en dos oportunidades·d⁻¹. En el tiempo del estudio, fueron ordeñadas 20 vacas con una producción media diaria de 300 litros (L). La segunda finca fue clasificada como semi-intensiva, con 32 vacas Holstein de pureza racial variada, que pastoreaban en parte del d en 4 has, con racionamiento de balanceado comercial y pasto de corte, solamente durante los dos ordeños diarios, de manera *ad libitum*. El galpón de manejo era de 700 m², y obtenían al momento del estudio, unos 180 L de leche con 16 vacas en promedio·d⁻¹.

La tecnología utilizada para la medición de los gases CO₂ y CH₄ fue el “IoT”, (el “internet de las cosas” por sus siglas en inglés - Internet of Things) [15, 18]. Es la integración de distintas tecnologías electrónicas, informáticas y logísticas, en pro de mejorar la eficiencia de una actividad productiva o del bienestar general. Es un concepto ideado en 1999, por el investigador y pionero tecnológico británico Kevin Ashton, del MIT, en la Universidad de Cambridge, Estados Unidos de América (EUA).

En este trabajo se utiliza la filosofía del IoT, integrando varias tecnologías avanzadas en la medición de gases considerados contaminantes del ambiente, como son el CO₂, el CH₄, además de parámetros climáticos como temperatura, humedad relativa y presión atmosférica en el lugar de producción animal. Se empleó el Smart Environment Libelium (SEL) [15], para la medición de los gases citados, integrando al menos siete tecnologías:

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 Wasp-Mote, plataforma modular electrónica “opensource” 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;

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).

Mediante este equipamiento integrado, se registraron parámetros de CO₂ en partes por millón (ppm), CH₄ en % LEL (Low Explosive Level o Límites inferiores de explosividad del metano), presión atmosférica (hPa), humedad relativa (%) y temperatura (°C). El SEL fue colocado de manera permanente en ambas fincas, dentro del galpón de ordeño diario, hasta alcanzar un volumen de 7.000 datos de cada GEI en estudio. Es importante mencionar que este equipo, de modelo Environment, de la empresa Libelium (España) con plataforma de transmisión perteneciente a Convergía (empresa multinacional canadiense con sede en Chile), tiene capacidad para registrar un dato, aproximadamente cada 400 segundos (seg), alcanzando así, unos 210 datos (± 30) de cada gas en estudio y de los parámetros climático, por d, transmitido y almacenado siempre en tiempo real.

Los datos fueron sometidos primeramente a un análisis exploratorio, a efectos de identificar el patrón de comportamiento de los mismos, específicamente la distribución teórica; para ello se empleó el test de Kolmogorov – Smirnov [17]. Igualmente se procedió a determinar las estadísticas descriptivas; 1) de manera Global (Intensivo; Semi-intensivo), como también, 2) por sistemas de PBL (Intensivo x Semi-intensivo). Posteriormente, se analizó la asociación entre las variables: CO₂ (ppm), humedad relativa (%), temperatura (°C) y presión atmosférica (hPa), mediante el coeficiente de correlación de Spearman, técnica utilizada para observaciones con distribuciones no paramétricas [22]. Finalmente, para comparar el nivel de partes por millón (ppm)

de CO₂, según la franja horaria (00 a 06 horas (h); 06 a 12 h; 12 a 18 h y de 18 a 00 h) y el factor bloque Sistema, se empleó el ANOVA basado en procedimientos de permutación y el test de Tukey, como prueba post hoc. Cabe mencionar que las pruebas de permutación no requieren del cumplimiento de la distribución teórica normal de los datos [1 - 3].

Todos los análisis descriptivos e inferencial, fueron materializados a través del software estadístico R Project for Statistical Computing [19] (mediante los paquetes: PerformanceAnalytics y ImPerm), este entorno de programación se caracteriza por su versatilidad en los procedimientos estadísticos, la alta calidad de los gráficos generados y principalmente, por ser de libre distribución y de código abierto, lo cual permite estar en constante desarrollo en su funcionalidad [5, 10].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la TABLA I se presentan las medidas descriptivas para los GEI estudiados en este trabajo (CO₂ y CH₄) y las tres variables climáticas registradas (temperatura *in situ*, humedad relativa y presión atmosférica). La misma comprende los promedios globales, incluyendo ambos sistemas lecheros (intensivo y semi-intensivo) que conformaron esta investigación.

De forma global, el promedio de CO₂ fluctuante en un galpón de PBL, en Paraguay, se encontró en 325,80 ppm, con Desvío Estándar (DE = 117,36) y un Coeficiente de Variación (CV = 36 %) relativamente buenos. Estos niveles se dieron a temperatura promedio de 22 °C y humedad en torno a 60 %. Sin embargo, el CH₄ nunca alcanzó las 70 ppm, teniendo en cuenta que el Sensor de CH₄ no detectó valores superior a 0,0000000001 % LEL. Teye y col. [23], emplearon diferentes detectores de gases y evaluaron la calidad del aire considerando tres sistemas de medición (Estacionaria, Inalámbrica y Móvil) que fueron ubicados en el centro del galpón de lechería. Para Estacionaria (por dentro), utilizando el sensor SenseAir AB modelo K30 arrojó una media de 1.680 ppm de CO₂ (DE 19,5); pero con bajas temperaturas medias (7,3 °C) y alta humedad relativa, de media igual a 87,7 %.

TABLA I
Medidas descriptivas de las distintas variables en bovinos

| Medidas | Temperatura (°C) | Humedad Relativa (%) | Presión Atmosférica (hPa) | CO ₂ (ppm) | CH ₄ (% LEL) |
|----------|------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Media | 22,14 | 59,53 | 1000,60 | 325,80 | 0,00 |
| D.E. | 5,24 | 20,45 | 8,78 | 117,36 | 0,00 |
| Varianza | 27,42 | 418,28 | 77,13 | 13774,27 | 0,00 |
| CV | 23,65 | 34,35 | 0,88 | 36,03 | - |
| Mínimo | 5,80 | 23,00 | 986,8 | 244,1 | 0,00 |
| Máximo | 33,80 | 100,00 | 1029,90 | 995,50 | 0,00 |
| Rango | 28,00 | 77,00 | 43,10 | 751,40 | 0,00 |
| Mediana | 22,30 | 55,00 | 998,50 | 292,90 | 0,00 |

DE: Desviación Estándar; CV: Coeficiente de Variación; °C: grado Celsius; hPa: Hectopascal; CO₂: Dióxido de Carbono; ppm: partes por millón; CH₄: metano; LEL: lower explosive limit

Cuando fue Estacionaria (por fuera), los niveles de CO₂ fluctuaban en media de 440 ppm (DE 1,1); con temperatura media de -7,5 °C y humedad relativa del 75,2 %. Ya para medición Inalámbrica (por dentro), se obtuvieron valores medios de CO₂ de 1.230 ppm (DE 10,9); temperatura media de 8,2 °C y humedad relativa de media 83,9 %. Inalámbrica (por fuera), fue una media de 390 ppm (DE 2.4) para el CO₂, una temperatura media -7,8 °C y humedad relativa de media igual a 73,1 %. Para la medición Móvil (por dentro), se observaron que los valores fueron para la media 1.625 ppm de CO₂ (DE 10,3) con 8,5 grados de temperatura y 89,7 % de humedad. Con otro equipo (Agilent Technologies 6890 GC, Santa Clara-California), en el mismo sistema de medición, pero (por fuera) registró una media de 385 ppm de CO₂ (DE 2,6); temperatura de -8,0 °C y humedad de 69,5 %.

Es probable que las variaciones también pudieran darse por cuenta del tipo de equipamiento medidores de gases inteligentes, conocidos como portátiles y "low-cost", que pueden presentar niveles distintos de sensibilidad y capacidad de captación [6]. Pero, en definitiva, estos equipamientos son lo que, en un futuro no muy lejano, serían utilizados por organismos oficiales de control del ambiente y organizaciones no gubernamentales ambientalistas, para evaluar/medir los GEI emanados o fluctuantes en ganaderías, y determinar sobre ello, escalas de impuestos "verdes" para compensación.

Por otro lado, los autores [23] señalan que el movimiento de las vacas alrededor del edificio lechero junto con la multidireccional naturaleza del aire a sus velocidades, estratificación de temperatura, gas flotabilidad, y el diseño estructural de la granja lechera fueron las principales causas de variabilidad espacial en los galpones. A su vez indican que la temperatura, la humedad relativa y las concentraciones de gas fueron más bajas en las ubicaciones exteriores del edificio a medida que fluía el aire fresco a través de las aberturas de ventilación del muro cortina. Así mismo, indican que las concentraciones de gas y temperaturas aumentaron hacia el centro del edificio de la lechería.

En el caso del CH₄, Jungbluth y col. [12] mencionan que, en las condiciones experimentales durante cuatro d en estación fría, la concentración media CH₄ fue en promedio de 84 ppm, que significa 14 unidades de CH₄, arriba, que el sensor SEL utilizado en este estudio, ya detectaría (a partir de 70 ppm). Otros trabajos realizados por Teye y col. [24], muestran una comparación entre calidad del aire de instalaciones lecheras y microclimas observados para 14 galpones lácteos en Finlandia y Estonia, donde los valores obtenidos fueron los siguientes: para el microclima observado el CH₄ obtuvo un valor máximo de 223 ppm (el equipo utilizado en este trabajo sí detectaría), mientras que para el valor mínimo fue de 1,5 ppm, que no sería detectado por el SEL considerado en esta investigación.

Cuando se analizan las frecuencias, las mayores para CO₂ se observan entre 200 y 300 ppm, pero si se visualiza en la TABLA I, la media dada para este gas, fue de 325,80 ppm. Según los estudios de Jungbluth y col. [12] se observan que, en condiciones experimentales durante cuatro d (estación fría), las concentraciones máximas y mínimas de dióxido de carbono (CO₂ en ppm) fueron entre 974 y 1.480 ppm, con un promedio de 1.196. Cabe mencionar que el valor mínimo se acerca bastante a los valores máximos (995,50 ppm) obtenidos en este estudio, en Paraguay.

Según lo registrado por Madsen y col. [16], las mediciones dadas por el equipo portátil GASMET 4030 (Gasmets Technologies Oy, Pulttitie 8A, FI-00880 Helsinki, Finlandia), en un establo de vacas, arrojó un valor de 3.880 ppm de CO₂. Por otro lado, la Comisión Internacional de Ingeniería Agrícola (siglas originales en francés: CIGR) [7], reitera primero que el CO₂ producido por el metabolismo de los animales y luego exhalado; describe en segundo término, que la concentración de este gas es una medida de contaminación general del aire interior y que, además la concentración de dicho gas dentro de los galpones debe ser lo más bajo posible, ya que el valor de cálculo asumido para el requisito de ventilación mínima es de 3.000 ppm; reconociendo que pueden ocurrir fluctuaciones temporales. Destacan que, el aire exterior contiene 300 ppm de CO₂ y el aire exhalado de pulmones humanos, contiene de 40.000 a 60.000 ppm. Esto proporciona un buen contexto.

Con relación a las recomendaciones dada por la CIGR [7], Teye y col. [24], mencionan que las concentraciones de CO₂ estuvieron en el rango de niveles recomendados en todos los galpones lácteos no aislados, destacando que la concentración en edificios semi-aislados a veces aumenta más allá de 3.000 ppm. A su vez, también indican que la concentración promedio general de CO₂ en el aire interior fue de 950 ppm, y el CH₄ fue de 48 ppm para los 14 galpones estudiados por ellos. En algunos casos, sin embargo, las concentraciones de CH₄ se acercaron a 200 ppm, que puede ser considerada alta (en Paraguay, no fueron alcanzados estos valores de CH₄). Además, indican que las mayores concentraciones de CO₂ y CH₄ se observaron entre 5 y 7 m por encima de las vacas, atribuidas a la acumulación de gases a medida que escapaban por las aberturas de ventilación. Harper y col. [11], observaron que la producción de CH₄ de novillas en pastoreo fue 321,2 L·cabeza⁻¹·d⁻¹, que corresponde a entre 7,7 y 8,4 % LEL del GEI, mientras que, cuando los mismos animales fueron puestos en el corral de engorde y alimentados con una dieta alta en granos, produjeron 98 L·cabeza⁻¹·d⁻¹ equivalentes a 1,9 - 2,2 % LEL. Con respecto a la madurez del forraje, Robertson y Waghorn [20], observaron que la producción de CH₄ de las vacas lecheras que pastaban en praderas en septiembre (primavera) fue entre 4,5 y 5,7 % LEL, mientras que se incrementó a 6 o 7 % cuando las vacas pastoreaban en diciembre (verano) de la misma temporada.

Según los datos reportados por Teye y col. [23], mencionan que en la variación media del CH₄ (ppm) en el microclima de la construcción lechera medida a varias alturas fueron los siguientes, para una altura de 10 centímetros (cm) una media de 116 ppm, a los 1 m un valor de 118 ppm, a los 2,5 m arrojó un promedio de 127 ppm y, a una altura de 7 m una media de 127 ppm. En el caso paraguayo, fue medido entre 1,5 y 2,5 m de altura del piso del galpón lechero.

Según los resultados encontrados por Cole y col. [8], la suplementación con proteínas de forrajes de baja calidad o el aumento de la calidad de las dietas a base de forrajes reducirán potencialmente la huella de carbono de la producción bovina, y además, del CH₄, que representa una pérdida de energía del alimento que consume el animal: las calorías van al aire en lugar de mantener al animal prosperando y produciendo carne y leche, en este estudio 8 - 9 % de la energía bruta se perdió como CH₄ y el 4 - 5 % del Carbono diario ingerido por los novillos se perdió como CH₄.

Según los estudios de Jungbluth y col. [12], mencionan que las emisiones de CO₂ del ganado lechero muestran un curso diurno

típico y sincrónico con las emisiones más bajas a primera h de la mañana y las más altas durante las h de alimentación con un aumento del 30 - 50 %.

En la TABLA II, se exponen los valores descriptivos según el sistema; intensivo y semi-intensivo, para los dos GEI estudiados (CO₂ y CH₄) y las 3 variables climáticas registradas (temperatura *in situ*, humedad relativa y presión). Cabe señalar que fueron calculados, la media, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación (CV), valores mínimos y máximos, el rango y la mediana.

De acuerdo a lo reportado por Teye y col. [24], los valores promedios registrados en 14 naves lecheras evaluadas en Estonia y Finlandia, en las estaciones de verano e invierno con diferentes sistemas; Semi-intensivo (S) e Intensivo (I), obtuvieron los siguientes datos en invierno, para Estonia: con sistema I se observó una media de 672 ppm CO₂; en cambio para el S, un promedio de 1.125 ppm CO₂. Para el verano, en sistema I alcanzó una media de 605 ppm CO₂, en contraste con el modo S donde observaron un promedio de 1.051 ppm CO₂; algo similar al invierno. Para Finlandia en invierno, la media alcanzó un valor de 1.006 ppm vacas I, mientras que con el sistema S fue de 1.576 ppm. Pero siempre las temperaturas estuvieron durante el invierno, por debajo de las temperaturas óptimas recomendadas (5 - 15 °C) en el S y todos los galpones I.

Según los estudios de Feddes y col. [9], se observan que las concentraciones medias para el CO₂ por vaca entre las cuatro unidades lecheras (A, B, C y D) estuvieron por encima de los encontrados en este trabajo, pero con temperaturas inferiores, (valores promedios fueron de 8,1; 6,4; 13,1 y 16,3 °C siguiendo el mismo orden de las unidades lecheras. Las emisiones de CO₂ son mayores en ganado en pastoreo (mayor gasto de energía) que en condiciones estabuladas [4].

En un trabajo realizado por Kinsman y col. [13], el CO₂ fluctuante se evaluó con un analizador de gas infrarrojo Siemens Ultramat 21 (Siemens Automation Group, Karlsruhe, Alemania), en donde la detección de gases para CO₂ presenta un rango de 0 a 5.000 ppm, señalando de que esos límites abarcaron el rango de concentraciones de gases esperadas para un establo lechero típico, que varían de 350 a 5.000 ppm de CO₂.

Cuando se procedió a realizar el estudio de Correlaciones de Spearman entre las distintas variables estudiadas dentro del galpón, como son la temperatura (grados centígrados), humedad relativa (%), presión atmosférica (hectoPascal) como así también la concentración de CO₂ en ppm, con un intervalo de medición de 6,5 minutos (min) aproximadamente, se observaron los resultados siguientes (FIG. 1).

TABLA II
Medidas descriptivas de las distintas variables según sistema

| Sistema | Medidas | CO ₂ (ppm) | CH ₄ (% LEL) | Temperatura (°C) | Humedad Relativa (%) | Presión Atmosférica (hPa) |
|----------------|----------|--------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|
| Intensivo | Media | 350,43 | 0,00 | 23,51 | 58,02 | 999,04 |
| | D.E. | 149,72 | 0,00 | 3,68 | 21,63 | 4,73 |
| | Varianza | 22415,49 | 0,00 | 13,53 | 468,01 | 22,41 |
| | CV | 42,70 | - | 15,64 | 37,29 | 0,47 |
| | Mínimo | 263,75 | 0,00 | 12,20 | 25,00 | 991,30 |
| | Máximo | 995,50 | 0,00 | 32,90 | 94,00 | 1011,60 |
| | Rango | 731,75 | 0,00 | 20,70 | 69,00 | 20,30 |
| | Mediana | 302,48 | 0,00 | 24,50 | 52,00 | 998,80 |
| Semi-intensivo | Media | 296,34 | 0,00 | 20,50 | 61,35 | 1002,44 |
| | D.E. | 43,33 | 0,00 | 6,25 | 18,79 | 11,67 |
| | Varianza | 1877,71 | 0,00 | 39,07 | 352,98 | 136,13 |
| | CV | 14,62 | - | 30,49 | 30,62 | 1,16 |
| | Mínimo | 244,07 | 0,00 | 5,80 | 23,00 | 986,80 |
| | Máximo | 706,57 | 0,00 | 33,90 | 100,00 | 1029,90 |
| | Rango | 462,50 | 0,00 | 28,10 | 77,00 | 43,10 |
| | Mediana | 292,67 | 0,00 | 20,80 | 60,00 | 998,10 |

DE: Desviación Estándar; CV: Coeficiente de Variación; CO₂: Dióxido de Carbono; ppm: partes por millón; CH₄: metano; LEL: lower explosive limit; °C: grado Celsius; hPa: Hectopascal

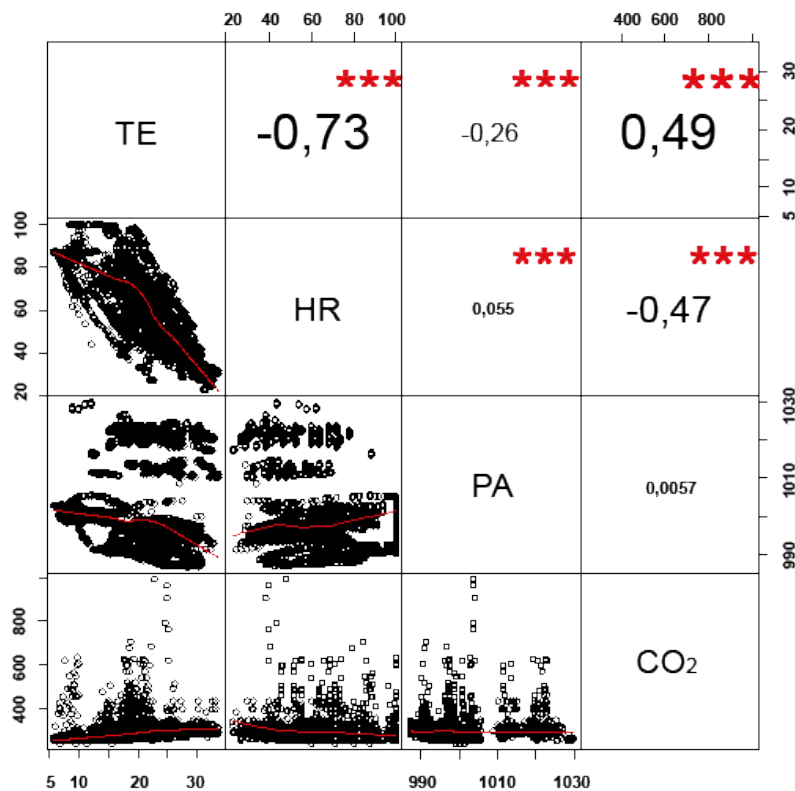


FIGURA 1. Correlaciones de Spearman entre las distintas variables con intervalo de medición de 6 minutos. * La correlación es significativa al nivel 0,001. TE: Temperatura (Grado Celsius); HR: Humedad Relativa (%); PA: Presión Atmosférica (hectopascal); CO₂: Dióxido de Carbono (partes por millón)**

Según los estudios de Rodríguez y col. [21], relacionados a flujos de CH₄ y CO₂, se mencionan que los incrementos en intervalos de 30 min de CO₂ generalmente están asociados al incremento en CH₄, principalmente cuando los vientos provienen de la orientación sur y suroeste, que corresponde al área donde se localiza el ganado y por lo general ocurre en la tarde y noche. Orientación del viento, no fue registrado en este primer trabajo en Paraguay, pero sí se ha encontrado correlaciones positivas y medias (0,49) entre el CO₂ y la temperatura, y negativas entre el mismo gas y la humedad relativa.

Feddes y col. [9], mencionan que la variación en la producción de CO₂ por vaca entre las cuatro unidades lecheras era bastante grande, además indican que intentaron explicar esa variación mediante análisis de regresión. Las emisiones de CO₂ están correlacionadas con la ingesta de alimentos y la producción de leche en vacas lactantes [13,14].

Finalmente, de acuerdo al Análisis de Variancia Permutacional y el Test de Tukey bajo un criterio de 95 % de probabilidad de acierto, para analizar el nivel de CO₂ medidos en ppm, considerando los factores de variación de franja horaria y el factor bloque sistema (intensivo vs semi-intensivo), se evidenció diferencias estadísticamente significativas (P < 0,05) entre el sistema intensivo y semi-intensivo (P < 0,05). Igualmente en las franjas horarias,

comparando entre madrugada (00 a 06 h) y la mañana (06 a 12 h), entre madrugada y la tarde (06 a 18 h) y, entre la mañana y la noche (18 a 00 h). Contrastando mañana con tarde y tarde con noche, no se encontraron diferencias importantes entre promedios de fluctuación de CO₂, en los galpones de producción de leche (TABLA III). Por tanto, comparando niveles de CO₂ en galpones lecheros típicos de Paraguay, entre sistemas Intensivos vs Semi y, entre madrugada y diferentes h del d se observan variaciones importantes. Estos incrementos en la fluctuaciones de CO₂ en al aire de galpones, podría ser mejorado o controlado, siempre con un manejo rotacional y nutricional planificado [8], aunque por los niveles de CO₂ encontrados en este trabajo, se encuentran en rangos normales [7] y no deberían ser considerados por la sociedad, como alarmante.

CONCLUSIÓN

De manera global, el mayor promedio de CO₂ (ppm), en cuanto a sistemas (Intensivo; Semi-Intensivo), fue evidenciado en el sistema Intensivo de producción de leche.

Los niveles de CH₄ (% LEL) fluctuantes en ambos galpones de PBL, en Paraguay, sin importar las franjas horarias ni los tipos de sistemas, siempre se mantuvieron por debajo del nivel de

TABLA III
Comparación pareada mediante la prueba Tukey HSD

| Factor | Pares de comparaciones | Probabilidad |
|-------------------|--------------------------------|--------------|
| Sistema/Situación | Intensivo vs Semi Intensivo | 0,0000* |
| | 00:00 a 06:00 vs 06:00 a 12:00 | 0,0011* |
| Franja horaria | 00:00 a 06:00 vs 12:00 a 18:00 | 0,0268* |
| | 00:00 a 06:00 vs 18:00 a 00:00 | 0,7324 |
| | 06:00 a 12:00 vs 12:00 a 18:00 | 0,8305 |
| | 06:00 a 12:00 vs 18:00 a 00:00 | 0,0357* |
| | 12:00 a 18:00 vs 18:00 a 00:00 | 0,2813 |

* Diferencia significativa a un nivel de probabilidad de 5 %

captación del sensor inteligente de este gas, considerado bastante reducido. Se detectó correlación positiva entre los niveles de CO₂ (ppm) y temperatura (°C), aunque moderada. Correlación negativa entre CO₂ y la humedad relativa del galpón de producción.

Se evidenciaron diferencias importantes en los valores de CO₂, cuando se evaluaron fluctuaciones entre sistemas y franjas horarias. Fue determinante estadísticamente, las diferencias en niveles de CO₂ fluctuantes entre las cuatro franjas horarias en estudio. Los niveles de CO₂ (ppm) fluctuantes en ambos galpones de PBL, en Paraguay, sin importar las franjas horarias ni los tipos de sistemas, pueden considerarse normales a la atmósfera encontrada en las urbes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y la Universidad Nacional de Asunción (UNA), por ayudar a materializar el trabajo. Este proyecto fue financiado por el CONACYT 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”, y al Rancho San Fernando, por facilitar sus establecimientos para las mediciones expuestas y analizadas en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERTON, B. A. V.; NICHOLS, T. E.; GAMBA, H. R.; WINKLER, A. M. Multiple testing correction over contrasts for brain imaging. **NeuroImage**. 216: 1-14. 2020.
- ANDERSON, M. J.; MILLAR, R. B. Spatial variation and effects of habitat on temperate reef fish assemblages in northeastern New Zealand. **J. Exper. Marine Biol. Ecol.** 305(2): 191-221. 2004.
- ANDERSON, M. J. Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression. **Canad. J. Fish. Aquatic Sci.** 58(3): 626-639. 2001.
- AUBRY, A.; YAN, T. Meta-analysis of calorimeter data to establish relationships between methane and carbon dioxide emissions or oxygen consumption for dairy cattle. **Anim. Nutr.** 1: 128-134. 2015.
- AVELLO-MARTÍNEZ, R.; SEISDEDLO-LOSA, A. El procesamiento estadístico con R en la investigación científica. **MediSur**. 15(5): 583-586. 2017.
- BULOT, F. M. J.; JOHNSTON, S. J.; BASFORD, P. J.; EASTON, N. H. C.; APETROAIE-CRISTEA, M.; FOSTER, G. L.; MORRIS, A. K. R.; COX, S. J.; LOXHAM, M. Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment. **Sci. Rep.** 9(1): 1-13. 2019.
- COMMISSION INTERNATIONALE DU GENIE RURAL (CIGR). Climatization of Animal Houses, Report of working group on climatization of animal houses. Report of working group. 1984. Aberdeen, Scotland. On Line: <https://bit.ly/3hNcyJ8>.01-09-20.
- COLE, N. A.; MEYER, B. E.; PARKER, D. B.; NEEL, J.; TURNER, K. E.; NORTHUP, B. K.; JENNINGS, T.; JENNINGS, J. S. Effects of diet quality on energy metabolism and methane production by beef steers fed a warm-season grass-based hay diet*. **Appl. Anim. Sci.** 36: 652-667. 2020
- FEDDES, J. J. R.; LEONARD, J. J.; MCQUITTY, J. B. Carbon Dioxide Concentration as a Measure of Air Exchange in Animal Housing. **Can. Agric. Eng.** 26: 53-56. 1984.
- FERNÁNDEZ-LIZANA, M. I. Ventajas de R como herramienta para el Análisis y Visualización de datos en Ciencias Sociales. **Rev. Cientif. UCSA.** 7(2): 97-111. 2020.
- HARPER, L. A.; DENMEAD, O. T.; FRENEY, J. R.; BYERS, F. M. Direct measurement of methane emissions from grazing and feedlot cattle. **J. Anim. Sci.** 77: 1392-1401. 1999.
- JUNGBLUTH, T.; HARTUNG, E.; BROSE, G. Greenhouse gas emissions from animal houses and manure stores. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 60: 133-145. 2001.
- KINSMAN, R.; SAUER, F. D.; JACKSON, H. A.; WOLYNETZ, M. S. Methane and carbon dioxide emissions from dairy cows in full lactation monitored over a six-month period. **J. Dairy Sci.** 78(12): 2760-2766. 1995.
- KIRCHGESSNER, M.; WINDISH, W.; MÜLLER, H. L.; KREUZER, M. Release of stocking methane and of carbon dioxide by dairy cattle. **Agric. Res.** 44: 91-102. 1991.
- LIBELIUM. Libelium World. 2021. Smart Environment. On Line: <https://www.libelium.com/>. 22-05-2021.
- MADSEN, J.; BJERG, B. S.; HVELPLUND, T.; WEISBJERG, M. R.; LUND, P. Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants. **Livest. Sci.** 129: 223-227. 2010.
- MARTÍNEZ-LÓPEZ, R. Contrastes de normalidad. En: **Métodos estadísticos aplicados en Zootecnia**. 1a Ed. Etigraf, Asunción. 292pp. 2017.

- [18] PÉREZ, R.; NARVAJAS, S.; TERRY, E. IoT en ALC 2019: Tomando el pulso al Internet de las Cosas en América Latina y el Caribe. 2019. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). En línea: <https://doi.org/gmtr>. 28-09-20.
- [19] R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. 2020. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. On Line: <https://www.r-project.org/>. 01-09-20
- [20] ROBERTSON, L. J.; WAGHORN, G. C. Dairy industry perspectives on methane emissions and production from cattle fed pasture or total mixed rations in New Zealand. **Proc. N. Z. Soc. Anim. Prod.** 62: 213–218. 2002.
- [21] RODRÍGUEZ, J. C.; PAZ-PELLAT, F.; WATTS, C.; LIZARRAGA-CELAYA, C.; YÉPEZ-GONZÁLEZ, E.; JIMÉNEZ-FERRER, G.; CASTELLANOS-VILLEGAS, A.; HINOJO-HINOJO, C.; MACÍAS-VÁZQUEZ, C. E. Methane and carbon dioxide measurements using the eddy covariance technique in semi-stabled dairy cattle in Sonora, México. **Terra LatinAme.** 37(1): 69-80. 2019.
- [22] SIEGEL, S.; CASTELLAN, N. J. Medidas de Asociación no paramétricas. En: **Estadística no paramétrica: aplicada a las ciencias de la conducta**. 4a Ed. Trillas, México. 437pp. 1995.
- [23] TEYE, F. K.; ALKKIOMAKI, E.; SIMOJOKI, A.; PASTELL, M.; AHOKAS, J. Instrumentation, measurement and performance of three air quality measurement systems for dairy buildings. **Appl. Eng. Agric.** 25: 247–256. 2009.
- [24] TEYE, K. F.; HAUTALA, M.; PASTELL, M.; PRAKS, J.; VEERMÄE, I.; POIKALAINEN, V.; PAJUMÄGI, V.; KIVINEN, T.; AHOKAS, J. Microclimate and ventilation in Estonian and Finnish dairy buildings. **Energy Build.** 40(7): 1194-1201. 2007.
- [25] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Acuerdo Internacional de París. 2015. Framework Convention on Climate Change. United Nations. On Line: <https://bit.ly/3hQU4ra>. 28-09-20.