



Efecto del clima sobre la respuesta térmica en vacas de diferentes grupos raciales en trópico bajo

Raúl Andrés Molina-Benavides^{1*} ; Sandra Perilla-Duque² ; Rómulo Campos-Gaona¹ 
Hugo Sánchez-Guerrero¹ ; Juan Camilo Rivera-Palacios³ ; Luis Armando Muñoz-Borja³ 
Daniel Jiménez-Rodas³ 

¹Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Producción Animal. Palmira, Colombia.

²Productos Naturales de la Sabana SAS "Alquería". Palmira, Colombia.

³Centro internacional de agricultura tropical. Grupo de Investigación de Agricultura Digital CGIAR. Palmira, Colombia.

*Correspondence: ramolinab@unal.edu.co

Recibido: Septiembre 2022; Aceptado: Julio 2023; Publicado: Agosto 2023.

RESUMEN

Objetivo. La idea principal de este estudio fue cuantificar la relación entre las variables climáticas y la temperatura corporal timpánica registrada mediante el uso de sensores inalámbricos en vacas en pastoreo ubicadas en trópico bajo. **Material y métodos.** Se monitorizó la temperatura timpánica de veintiocho vacas en pastoreo, de varias razas, en lactación temprana. Los sensores se instalaron manualmente en el canal timpánico, registrando datos cada hora durante 17 días. Los datos climáticos se obtuvieron de la red de estaciones meteorológicas del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar "Cenicaña", el cual se encuentra ubicado en la ciudad de Cali, Colombia; estos datos se analizaron con el mismo intervalo de tiempo de la temperatura. La información se analizó mediante estadística descriptiva, matrices de correlación y modelos Random Forest, a través del software R. **Resultados.** A partir de los datos fisiológicos recolectados automáticamente y analizados mediante Big data, se evaluaron los procesos de termorregulación, a través, de variables de respuesta. Encontramos que las variables temperatura ambiental, humedad relativa y, radiación solar fueron los factores que más influyeron en el proceso de adaptación homeotérmica de los animales. **Conclusiones.** La introducción de dispositivos remotos, y el uso de una gran cantidad de datos para el análisis de indicadores fisiológicos, evita modificar el comportamiento natural de los animales y surge como una importante estrategia de diagnóstico y gestión en fincas ganaderas, ayudando en los estudios de estrés calórico, adaptación fisiológica y, prevalencia a enfermedades hemotrópicas, la cuales reducen la productividad de los sistemas.

Palabras clave: Big-data; Bioclimatología; Estrés calórico; Fisiología; Modelos (*Fuente: CAB, FAO*).

ABSTRACT

Objective. The main idea of this study was to quantify the relationship between climatic variables and tympanic body temperature recorded through the use of wireless sensors in grazing cows located in low tropic. **Material and methods.** The tympanic temperature of twenty-eight cross breed grazing

Como citar (Vancouver).

Molina-Benavides RA, Perilla-Duque S, Campos-Gaona R, Sánchez-Guerrero H, Rivera-Palacios JC, Muñoz-Borja LA, Jiménez-Rodas D. Efecto del clima sobre la respuesta térmica en vacas de diferentes grupos raciales en trópico bajo. Rev MVZ Córdoba. 2023; 28(3):e2921. <https://doi.org/10.21897/rmvz.2921>



©El (los) autor (es) 2023. Este artículo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>), que permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de su obra de modo no comercial, siempre y cuando den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

cows in early lactation was monitored. The sensors were manually installed in the tympanic cavity, recording hourly for 17 days. The climate data was obtained from the network of weather stations of the Centro de Investigación de la Caña de Azúcar "Cenicaña", which is a research center for sugarcane located in Cali, Colombia, this data was analyzed for the same time interval of the temperature. The information was analyzed using descriptive statistics, correlation matrices and Random Forest models, through the R software. **Results.** From the physiological data from automatic collection systems, the response variables that would allow the evaluation of thermoregulation processes were analyzed using big data. We find that the variables environmental temperature, relative humidity and, solar radiation were the factors that most influenced the homeothermic adaptation process of the animals. **Conclusions.** The introduction of remote devices, and the use of a large amount of data for the analysis of physiological indicators, avoid modifying natural animal behavior and emerges as an important diagnostic and management strategy in the livestock farm, helping in the studies of heat stress, physiological adaptation and, prevalence to hemotropic diseases, which reduce the productivity of the systems.

Keywords: Big-data; bioclimatology; Colombia; heat stress; models; physiology (Source: CAB, FAO).

INTRODUCCIÓN

En los bovinos, las variables climáticas como la temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación desempeñan un papel importante en los procesos de regulación térmica del animal, mediante dos formas: i) interactúan directamente con la piel o el pelo y ii) estimulan los receptores nerviosos que se encuentran en la piel o en la retina, poniendo en acción los mecanismos compensatorios a través del hipotálamo (1). Diversos factores fisiológicos afectan la homeostasis térmica, entre ellos el estado sanitario, el tipo racial, las condiciones metabólicas, el color del pelo de los animales, los efectos ambientales como la presencia de árboles en los potreros, el consumo hídrico y el tipo de pastoreo participan en la regulación de los procesos de mitigación y adaptación al ambiente externo (2).

Las pérdidas productivas y económicas que pueden tener los ganaderos por efecto del estrés calórico causado por la variabilidad climática y el cambio climático generan preocupación en investigadores y tomadores de decisión (3). El desempeño de los sistemas se afecta, especialmente en ganaderías que se encuentran en pastoreo, en donde los bovinos y las pasturas se enfrentan directamente a las variables climáticas (4), con efectos negativos sobre la producción y reproducción de los animales (5, 6) y, en la cantidad y calidad de las pasturas como es propuesto (7,8).

Es conocido que existen grupos raciales de origen *Bos taurus* y *Bos indicus* adaptados a las condiciones del trópico bajo, por sus

modificaciones fisiológicas que les permiten mayor pérdida de calor, mejor conversión alimenticia y mejores índices reproductivos, lo cual permite evidenciar que los procesos de adaptación son exitosos; estas razas, por ejemplo, Hartón del Valle y Lucerna, son recursos genéticos nativos y constituyen una importante fuente de biodiversidad (9).

Uno de los principales índices de bienestar animal es la temperatura corporal, siendo un indicador de estrés en todas las especies (10,11). Otros indicadores como la frecuencia ruminal (12) y la frecuencia respiratoria pueden utilizarse para monitorizar el estrés por calor (13). Tradicionalmente, la temperatura rectal ha sido reportada como un buen indicador directo de la temperatura corporal interna en los bovinos (4,14,15), aunque su determinación requiere manipulación y sujeción de los animales; por otra parte, se conoce que los procesos de termorregulación que se realizan en el hipotálamo hacen que las mediciones realizadas en cercanías a este, por ejemplo, la temperatura medida en el canal timpánico, se consideren más sensibles a los mecanismos de ajuste hechos por el animal (16).

Las mediciones continuas de temperatura corporal en los bovinos son esenciales, principalmente para monitorear el estado de salud de los animales y prever respuestas a los efectos de estrés calórico (17,18). No obstante, en sistemas productivos en pastoreo, el uso de técnicas de medición tradicionales como la temperatura rectal, ocasiona estrés por el manejo durante el muestreo, lo cual puede arrojar datos erróneos al modificarse el comportamiento natural del animal. Adicionalmente, no es factible la

manipulación permanente de los animales para realizar la determinación del parámetro fisiológico.

En el campo de la ganadería de precisión, surgen nuevas tecnologías para la captura de datos a través de dispositivos inalámbricos que facilitan el monitoreo continuo de los animales, permitiendo detectar pequeños cambios que reflejan su salud y bienestar (18,19,20,21), lo cual puede ser útil en el seguimiento de un alto número de animales o en estudios de estrés donde se requiere mínima manipulación. La colecta de un gran número de datos en tiempo real a través del uso de dispositivos remotos, genera la necesidad de herramientas de análisis como son las metodologías de Big Data (18).

El objetivo de este trabajo fue estudiar la relación existente entre las variables climáticas (temperatura ambiental, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación) y la temperatura corporal timpánica de vacas de diferentes grupos raciales bajo pastoreo en condiciones de trópico bajo, a través del uso de sensores inalámbricos tipo IoT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio y sistemas de producción.

El estudio fue realizado en cuatro sistemas ganaderos bovinos, ubicados en la zona geográfica del Valle del Cauca, Colombia, bajo condiciones de trópico bajo entre los 3°30' a 4°78'N y 76°21' a 76°46' W, correspondiente a zona de bosque seco tropical según la clasificación de Holdridge citado por García et al (22). Cada sistema ganadero presentó un grupo racial único, seleccionado para la producción de leche, representativo de la región y con un número de animales adecuado. Las características principales de los predios se observan en la tabla 1. En total, se monitorearon veintiocho vacas en producción, siete por sistema, según Cavestany et al (23); los animales tenían más de tres partos y se encontraban en la primera fase de lactancia, por encima de 100 días. En todos los sistemas se utilizó el pastoreo y una suplementación nutricional mínima.

Recolección de datos

Temperatura timpánica. Mediante un sensor inalámbrico diseñado y producido por los autores, instalado manualmente en el canal timpánico de las vacas, a través de un mecanismo de colecta de datos electrónico tipo orejera, se recopiló información permanente cada hora, la media de tiempo fue de 17 días para la captación de datos. La transmisión de los datos se realizó en forma remota, vía bluetooth a una aplicación de celular (Figura 1). El tiempo de permanencia de los sensores en los animales varió entre sistemas y entre animales.

Tabla 1. Tipo de Sistema de producción, base forrajera y grupo racial de los animales incluidos en el estudio.

Sistema	Sistema de producción	Base forrajera	Grupo Racial
1	Pastoreo-doble ordeño	Cynodon nlemfuensis	Gyrolando
2	Pastoreo-doble ordeño	Cynodon nlemfuensis	Jersey
3	Silvopastoreo-doble ordeño	Cynodon nlemfuensis + Leucaena leucocephala	Lucerna
4	Pastoreo-un ordeño	Cynodon nlemfuensis	Hartón del Valle

Recolección de datos

Temperatura timpánica. Mediante un sensor inalámbrico diseñado y producido por los autores, instalado manualmente en el canal timpánico de las vacas, a través de un mecanismo de colecta de datos electrónico tipo orejera, se recopiló información permanente cada hora, la media de tiempo fue de 17 días para la captación de datos. La transmisión de los datos se realizó en forma remota, vía bluetooth a una aplicación de celular (Figura 1). El tiempo de permanencia de los sensores en los animales varió entre sistemas y entre animales.

La temperatura registrada por los sensores timpánicos fue validada con datos obtenidos, a través, de temperatura rectal de las vacas. Las diferencias encontradas en cuanto al punto anatómico de muestreo y su tiempo de respuesta fueron corroboradas por la literatura (8,11,17,18).

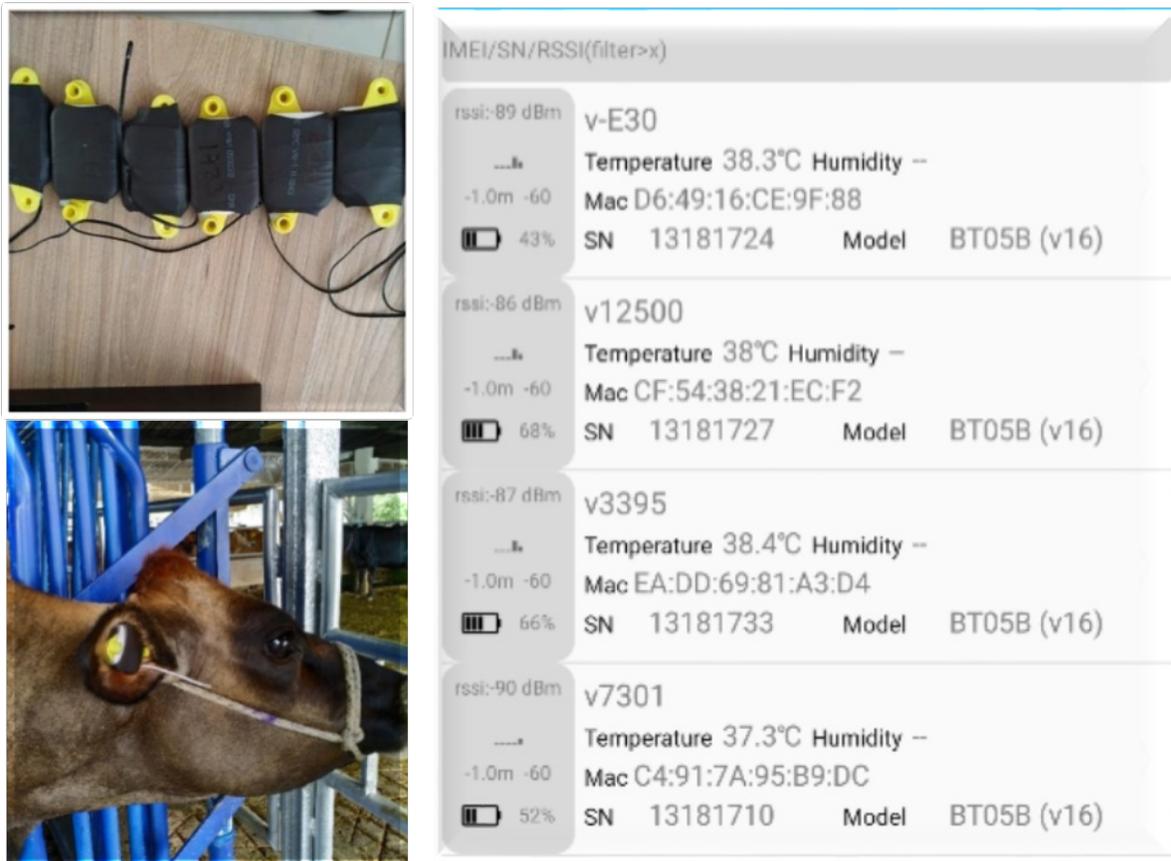


Figura 1. Obtención de temperatura timpánica: Sensores, ubicación y transmisión de datos.

Datos climáticos. La información del clima fue obtenida de cuatro subestaciones pertenecientes a la red de estaciones climáticas del Centro de investigación de la caña de azúcar "Cenicaña". De acuerdo, a la ubicación de cada uno de los sistemas ganaderos se le asignó la estación meteorológica más cercana. La distancia entre las estaciones y los sistemas estudiados fue: Sistema uno (6.2 km), Sistema dos (5.4 km), Sistema tres (5.6 km) y Sistema cuatro (6.5 km) (24). Las variables analizadas fueron temperatura ambiental ($^{\circ}\text{C}$), radiación solar (cal/cm^2), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y precipitación (mm). El intervalo de captura de la información fue horario, durante un periodo de 17 días continuos, concordantes con el tiempo de captura de datos por los sensores timpánicos.

Análisis estadístico. En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo (mínimo, máximo, media y desviación estándar) de cada una de las variables climáticas, para el manejo del alto volumen de datos se empleó el software estadístico R (25). Posteriormente, para conocer la relación entre las variables de clima y la temperatura timpánica de cada uno de los animales, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson. Con el total de

variables, se construyeron modelos de regresión múltiple para cada sistema, donde la variable dependiente fue la temperatura timpánica y las variables regresoras fueron las condiciones climáticas. Por último, con el fin de analizar la importancia de cada variable sobre la variación en la temperatura timpánica de los animales, se utilizó un modelo Random Forest (RF). Este modelo está basado en la concatenación de varios árboles de decisión (CART), el cual es un algoritmo que divide reiterativamente la base de datos en múltiples conjuntos, estas particiones son definidas a partir de condiciones aplicadas a las variables en determinados valores, el proceso es realizado de forma automática minimizando el error cuadrático (26). Una cualidad del modelo RF, es que, al momento de realizar la partición por una variable, el algoritmo mide un valor de importancia de haber utilizado dicha variable, este valor es sumado en todos los árboles. Al final, se obtiene una métrica que permite medir la importancia de cada variable predictora en el modelo sobre la variable de respuesta (26). Para este caso, se buscó encontrar las variables que tenían mayor influencia al momento de explicar la variación de la temperatura timpánica.

RESULTADOS

Comportamiento de la temperatura timpánica. Se obtuvieron 11332 registros de temperatura timpánica de los animales a través de los dispositivos de medición. Este alto volumen de datos permitió un monitoreo detallado de la información de respuesta fisiológica, lo cual constituye una ventaja de importancia del uso de sensores para obtención de información constante (Figura 2).

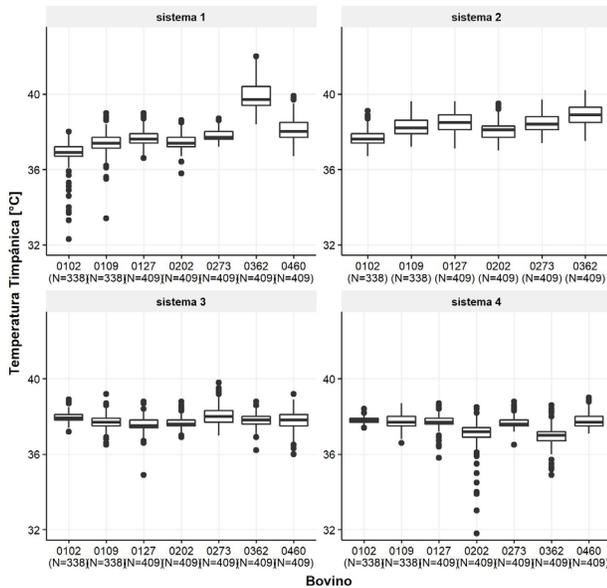


Figura 2. Temperatura timpánica media para cada uno de los sujetos experimentales en el estudio, distribuidos por sistema analizado.

Comportamiento del clima. La temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación asociadas con cada uno de los sistemas incluidos en el estudio, mostró un comportamiento similar entre estos, como se presenta en la figura 3, lo cual se deriva de la ubicación geográfica cercana de los sistemas estudiados, sin embargo, fueron observadas ligeras diferencias en las variables climáticas para cada uno de los sistemas, estas corresponden a las distintas épocas en que los sensores timpánicos fueron ubicados en los animales. En general, para todos los sistemas,

de acuerdo a la información de las cuatro estaciones, la humedad relativa osciló entre 37 y 100% ($\bar{X}=80.43 \pm 15.83$), la temperatura entre 17 y 33.3°C ($\bar{X}=23.79 \pm 3.62$), la radiación solar estuvo entre 0 y 93.9 cal/cm² ($\bar{X}=18.44 \pm 26.25$) y la velocidad del viento presentó valores entre 0 y 8.5 m/s ($\bar{X}=1.54 \pm 0.96$). La variable que presentó mayores diferencias entre los sistemas fue la precipitación debido al inicio de la temporada de lluvias para uno de los sistemas.

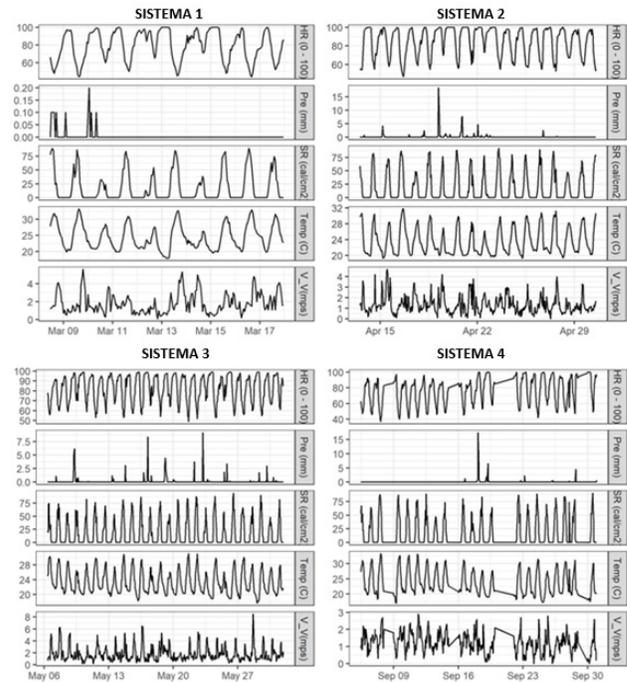


Figura 3. Comportamiento de las variables climáticas para cada uno de los sistemas incluidos en el estudio.

Efecto de las variables climáticas sobre la temperatura corporal timpánica. Con el fin de mostrar el comportamiento de las variables climáticas y la temperatura corporal timpánica, en la figura 4 se presenta esquemáticamente la información registrada sobre las variables en un periodo de 24 horas, la estandarización a escala única permite utilizar este mecanismo para evidenciar el comportamiento por sobreposición de las variables a un mismo rango de medida, lo cual da una información visual rápida e integral.

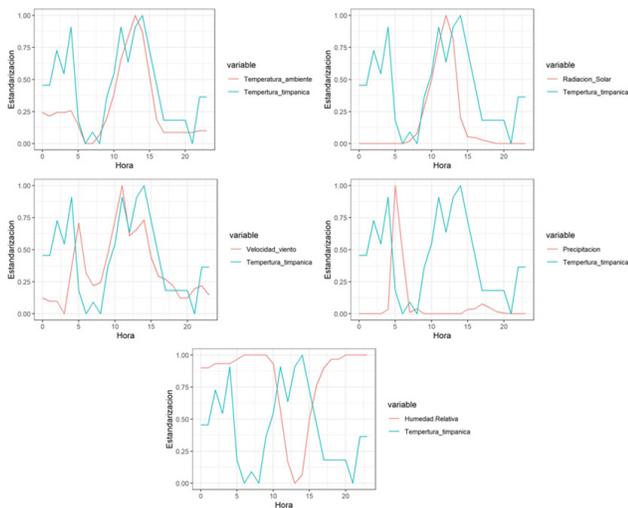


Figura 4. Comportamiento esquematizado durante 24 horas de las variables climáticas y la temperatura timpánica.

En la tabla 2 se puede observar como la temperatura timpánica de los animales responde a los cambios de magnitud en la temperatura ambiental, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y precipitación.

Tabla 2. Correlaciones parciales de Pearson entre la temperatura timpánica y las variables climáticas, para cuatro grupos raciales de bovinos productores de leche, en condiciones de trópico bajo.

GYROLANDO	TA	HR	RS	VV	PP
Tt_corr	0.33	-0.32	0.23	0.11	-0.09
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
JERSEY	TA	HR	RS	VV	PP
Tt_corr	0.54	-0.53	0.32	0.11	-0.12
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
LUCERNA	TA	HR	RS	VV	PP
Tt_corr	0.50	-0.48	0.31	0.21	-0.18
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
HARTON DEL VALLE	TA	HR	RS	VV	PP
Tt_corr	0.42	-0.41	0.39	0.03	-0.15
p-valor	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0190	<0.0001

Donde: Tt: temperatura timpánica, TA: temperatura ambiente, HR: humedad relativa, RS: Radiación Solar, VV: velocidad del viento, PP: precipitación

Las correlaciones exhibieron una relación media, que varía entre los -0.58 y 0.54 para las variables climáticas temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar, pero siempre fueron altamente significativas ($p < 0.0001$), excepto en un sistema, para velocidad del viento. Para precipitación las correlaciones fueron bajas y significativas ($p < 0.0001$).

En la tabla 3 se presentan las ecuaciones de regresión lineal para cada grupo racial, con sus respectivos R^2 . Es posible que las condiciones bioclimáticas de la zona, no sean extremas, dado que son cercanas a la zona de confort propuesta para bovinos, por lo cual los mecanismos de adaptación animal ya están en total funcionamiento y no presentan modificaciones fisiológicas importantes sobre las variables climáticas.

Tabla 3. Modelos lineales de regresión para cada uno de los grupos raciales estudiados.

Grupo Racial	Modelo	R²
Gyrolando	$T_{temp} = 36.6458502 + (0.0664121 * T_a) - (0.0029633 * H_R) + (0.3394821 * P_p) - (0.0001789 * R_S) - (0.0404804 * V_v)$	0.09897
Jersey	$T_{temp} = 35.4095877 + (0.1284013 * T_a) + (0.0001799 * H_R) - (0.0212793 * P_p) - (0.0042051 * R_S) - (0.0455783 * V_v)$	0.3271
Lucerna	$T_{temp} = 35.0247328 + (0.1011862 * T_a) + (0.0051454 * H_R) - (0.0449133 * P_p) - (0.0031803 * R_S) + (0.0046263 * V_v)$	0.2645
Hartón del Valle	$T_{temp} = 37.1735602 + (0.0253222 * T_a) - (0.0023876 * H_R) + (0.0113535 * P_p) + (0.0012828 * R_S) - (0.0657824 * V_v)$	0.1236

Donde Ttemp: temperatura timpánica (°C), Ta: temperatura ambiente (°C), HR: humedad relativa (%), Pp: precipitación (mm), RS: radiación solar (cal/cm²) y Vv: velocidad del viento (mps).

Finalmente, con el fin de analizar el efecto de variables ambientales y temperatura timpánica, se utilizó un modelo de Random Forest (RF) para explicar la variabilidad de la temperatura timpánica con las variables climáticas. En la figura 5 se muestra la importancia de cada variable climática al momento de explicar la variación de la temperatura timpánica, siendo el sistema 4, el tomado como referencia gracias al mayor número de datos que registró.

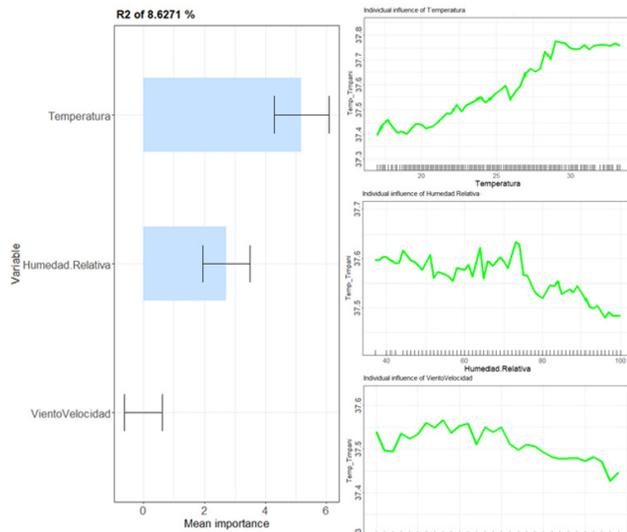


Figura 5. Modelo Random Forest para el sistema 4. Variables con mayor grado de importancia en la variabilidad de la temperatura timpánica.

DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue estudiar la relación entre las variables climáticas y la temperatura corporal timpánica en vacas de diferentes grupos raciales, bajo pastoreo, en el trópico bajo.

El uso de IoT a través de sensores (Figura 1) para obtener información fisiológica constante ha sido postulado por Neethirajan (19), confirmando la relación fisiológica (Figura 4) y su adaptación biometeorológica (27).

La determinación de la temperatura timpánica de forma permanente y sin manipulación del animal permite capturar un alto volumen de datos, lo que hace confiable el registro fisiológico, y refleja los mecanismos de ganancia o pérdida de calor endógeno (1,16).

Los resultados presentados en la figura 2, muestran valores que oscilan entre rangos fisiológicamente aceptados para vacas en lactación (36.8–39.5°C), las diferencias encontradas entre los animales dentro de un mismo sistema obedecen a respuestas individuales ante factores externos (6,14). Los valores encontrados en este estudio concuerdan con temperaturas timpánicas encontradas por otros autores (17,28,29).

Para el sistema uno (Figura 3), correspondiente al grupo racial Gyrolando, la variable que mayor

relación tuvo con la temperatura timpánica fue la temperatura ambiental (Tabla 2), con un valor de 0.33. Dada la relación inversa entre temperatura ambiente y la humedad relativa, las correlaciones encontradas para esta última y la temperatura timpánica presentaron similares valores negativos. La radiación solar también mostró correlación con la temperatura timpánica (0.23). Aunque el componente racial de este sistema contaba en su genética con un 50% de *Bos indicus*, especie con mayor resistencia a las condiciones ambientales del trópico (2), el valor medio de las correlaciones podrían atribuirse al color oscuro del pelaje de los animales utilizados, las vacas que mostraron los mayores valores presentaban pelaje con mayor proporción de coloraciones oscuras, lo que genera mayor absorción de radiación; esto concuerda con los resultados presentados por Gomes y Campos (27), en los cuales, las vacas con pelaje de color negro presentaron mayor temperatura rectal, en relación con las vacas de pelaje blanco. Por otro lado, el viento surge como una variable que mitiga el efecto adverso de la temperatura ambiente en los animales, debido a su acción de disipación térmica (30,31). Para este sistema, el viento muestra correlaciones positivas débiles con la temperatura timpánica de las vacas (0.11); esto podría atribuirse a que los patrones de comportamiento entre la temperatura ambiente y la velocidad del viento, al parecer no ejercen acciones contrarias entre ellas, se considera que el viento hace circular aire caliente ocasionando que, en el proceso de convección, los animales estén ganando calor en vez de perderlo. Por último, la precipitación mostró una correlación inversa y débil (-0.09), lo cual se debió a la ausencia o escasa lluvia en el periodo de muestreo.

El sistema dos (Figura 3), en la cual el grupo genético fue Jersey, genéticamente 100% *Bos taurus*, mostró correlaciones importantes entre la temperatura timpánica y la temperatura ambiental (Tabla 2), presentó valores de 0.54, esta correlación media, refleja un mayor efecto sobre los animales, entre estos el efecto del componente racial homogéneo, así la baja variabilidad del sistema evidencia que son animales más susceptibles a las condiciones ambientales del trópico, como es reportado por Gantner et al (32) y Ruíz-Jaramillo et al (33). La radiación solar presentó valores de 0.32, e indicaría la relación de mayor respuesta en temperatura corporal a esta variable. La correlación con la velocidad del viento fue de 0.11 y la precipitación exhibió relaciones débiles e inversas (-0.12).

El sistema tres (Figura 3), alojó el grupo racial Lucerna, raza sintética colombiana, desarrollada para soportar las condiciones de trópico bajo. Este sistema presentó menores correlaciones entre la temperatura timpánica y la temperatura ambiental (Tabla 2), con un valor de 0.50, más elevada que la informada en los sistemas anteriores, demostrando con su respuesta, la influencia de la adaptación animal a las condiciones climáticas en las que se originó la raza. La correlación con la radiación solar fue de 0.31, sin embargo, este grupo racial presenta una particularidad, y es el pastoreo en un sistema silvopastoril intensivo en la explotación. Los valores medios en las correlaciones se pueden deber a dos factores, el primero asociado al tipo de pastoreo, ya que los potreros en que se encuentran los animales están conformados por estratos de pasturas, arbustos y árboles, creando condiciones favorables para los animales; esto concuerda con los trabajos citados por otros autores (4,7) en los cuales, los animales que estuvieron en potreros con presencia de árboles presentaron menores temperaturas corporales que los animales en pasturas sin cobertura; el segundo factor se puede asociar a efecto de la raza la cual lleva muchos años de adaptación a las condiciones tropicales. La precipitación presentó valores de correlación de -0.18, esta mayor relación se debió a que en el tiempo de muestreo para este sistema las lluvias fueron más frecuentes. De acuerdo a esto, la precipitación también puede ser un factor de mitigación importante para la temperatura corporal. Por su parte, la velocidad del viento presentó correlaciones débiles pero positivas con la temperatura timpánica, similares a las encontradas en los otros sistemas, sin embargo, dado que la estación meteorológica que proporcionó los datos para este sistema no se encontraba dentro del arreglo silvopastoril, los datos de correlación obtenidos pudieron ser afectados dado que no tuvieron en cuenta la presencia de los árboles y arbustos en los potreros y su interacción con los animales.

El sistema cuatro (Figura 3), con vacas Hartón del Valle, raza criolla adaptada a las condiciones tropicales propias la zona agroecológica del estudio, presentó correlación media entre temperatura timpánica y temperatura ambiental (Tabla 2) con un valor de 0.42. Aunque esta correlación es menor que la encontrada en el sistema tres con un grupo racial también adaptado, los resultados del sistema cuatro, son inferiores a los presentados en los dos primeros sistemas en los cuales los animales

estaban en praderas sin árboles, similares a los de este sistema; esta menor correlación podría atribuirse al componente racial, relacionada con la adaptación al medio. Para radiación solar, el valor fue de 0.39, siendo el más alto en relación al total de sistemas; este resultado puede ser explicado por el hecho de que en este sistema productivo solo se realiza un ordeño diario, permitiendo a los animales pastorear después de esta actividad, dejándolos expuestos a la radiación solar durante más horas del día, incluyendo aquellas de mayor intensidad (12:00 a 15:00) según lo reportado por Anzures-Olvera et al (34), este manejo contrasta con los otros sistemas, en las cuales las vacas, para ese mismo periodo de tiempo, se encuentran en los establos para el segundo ordeño del día y por tanto reciben menor intensidad de radiación. La velocidad del viento y precipitación presentaron el mismo comportamiento que los sistemas uno y dos, sin mayor relación directa con la temperatura timpánica.

Al analizar los modelos lineales de regresión múltiple (Tabla 3), se encontró que los coeficientes de determinación generados explican poco la variación de la temperatura timpánica en función de las variables climáticas analizadas (temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación), similar hallazgo en condiciones tropicales fue informado previamente (30).

En general, se pudo observar que la relación de causalidad entre las condiciones climáticas en la zona ecológica (35) y la temperatura corporal timpánica presentan una correlación relativamente baja, 8.78%, siendo la temperatura ambiente y la humedad relativa las variables que presentan mayor incidencia. Sin embargo, el orden jerárquico de cada variable climática es propio para cada sistema. En los gráficos de influencia individual por variable climática sobre la temperatura timpánica (lado derecho de la figura), se presentan el comportamiento de las variables de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento con respecto a la temperatura timpánica. Cada Sistema tiene la particularidad de presentar, modificaciones exclusivas a sus condiciones de manejo y grupo racial, así por ejemplo, para la raza lucerna, ubicada en un sistema de silvopastoreo, la velocidad del viento es la variable con mayor peso e influencia (Figura 5), esto podría atribuirse al hecho de ser un sistema con amplia cobertura arborea, lo cual modifica la corriente de viento y la radiación solar; de esta manera

el microclima creado por los estratos arbóreos y arbustivos, genera modificaciones fisiológicas sobre los animales, como ya ha sido evidenciado en otro trabajo (7).

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio y en concordancia con lo propuesto por Wijffels et al (36), la inclusión de diferentes variables fisiológicas deben considerarse, para obtener un conjunto de factores bióticos y abióticos que permita generar mayor entendimiento en el proceso de homeotermia en las vacas productoras de leche bajo condiciones de pastoreo. Factores como las características individuales (color del pelo, edad, tamaño, condición corporal, entre otras), y variables como el tipo de sistema de producción, manejo de animales, nivel tecnológico y alimentación suministrada (dieta), pueden ser decisivos a la hora de analizar la relación del clima con los sistemas ganaderos. El peso del sensor IoT genera un largo tiempo de adaptación en el animal. Asimismo, las similares condiciones agroecológicas de la zona de estudio pueden provocar una limitación discriminativa que impida una mayor variación en la respuesta fisiológica de los animales.

En conclusión, la introducción de dispositivos tecnológicos que permiten la colecta de datos en los animales, sin modificar sus conductas naturales, surge como una estrategia de diagnóstico y manejo para los hatos ganaderos. Se conocen variaciones que se pueden encontrar entre individuos en un mismo rebaño, en ellos el uso de sensores inalámbricos que determinen permanentemente la temperatura corporal en los bovinos en tiempo real, ayuda en estudios sobre estrés calórico y enfermedades tropicales frecuentes en el trópico y reducen la productividad del sistema.

Las variables climáticas que tuvieron relación con los procesos de homotermia, bajo las condiciones de pastoreo, fueron la temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar. La precipitación puede tener un efecto positivo frente a la pérdida de calor en los animales, sin embargo, se requiere mayor número de datos

obtenidos en época de lluvia (número de días con precipitaciones) para tener un valor más confiable.

No se presentó un efecto directo de las variables climáticas sobre la temperatura corporal timpánica, de tal manera que ésta pueda asociarse al grupo racial y por extrapolación a la posible adaptación climática de los animales en los ecosistemas en donde fueron evaluados.

Se requieren futuros estudios en donde el análisis de la temperatura corporal de los animales no solo este en función del clima, si no, incluir otras variables fisiológicas y productivas como: peso metabólico, alzada y condición corporal, horas de consumo de alimento y producción diaria de leche, podrían ser analizadas y así poder estudiar mecanismos de adaptación y diseñar estrategias para mitigar los efectos del cambio climático, así mismo conocer los procesos de respuesta al estrés calórico en diferentes grupos genéticos asociados con sistemas ganaderos bovinos bajo pastoreo en condiciones de trópico bajo.

Conflicto de intereses

Los autores declararon ningún posible conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los propietarios y trabajadores de los sistemas: Garzonero, Marruecos, Agrosavia y El Hatico, por las facilidades logísticas para el trabajo; igualmente, al grupo de investigación de agricultura digital que hace parte tanto de CCAFS y la Plataforma de Big Data en Agricultura del CGIAR por su contribución y experticia en el procesamiento y análisis de datos.

Financiación

El presente trabajo se financió mediante el proyecto de la convocatoria Minciencias 776-2017.

REFERENCIAS

1. Collier R, Gebremedhin K. Thermal biology of domestic animals. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 2015; 3:513–532. <https://doi.org/10.1146/annurev-animal-022114-110659>
2. de Vasconcelos A, de Albuquerque C, de Carvalho J, Façanha E, Lima F, Silveira R et al. Adaptive profile of dairy cows in a tropical region. *Int J Biometeorol.* 2020; 64(1):105–113. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01797-9>
3. Oosting S, Udo H, Viets T. Development of livestock production in the tropics: Farm and farmers' perspectives. *Animal.* 2014; 8(8):1238–1248. <https://doi.org/10.1017/S1751731114000548>.
4. Barragán-Hernández W, Mahecha-Ledesma L, Cajas-Jirón Y. Variables fisiológicas-metabólicas de estrés calórico en vacas bajo silvopastoreo y pradera sin árboles. *Agron. Mesoam.* 2015; 26(2):211. <https://doi.org/10.15517/am.v26i2.19277>
5. Liu J, Chen L, Lu Y, Wang D. Effects of heat stress on body temperature, milk production, and reproduction in dairy cows: A novel idea for monitoring and evaluation of heat stress — A review. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 2019; 32(9): 1332–1339. <https://doi.org/10.5713/ajas.18.0743>
6. Barrera A, Angeli N, Machado L, Cardoso F, Gonzalez F. Relationships between heat stress and metabolic and milk parameters in dairy cows in southern Brazil. *Trop. Anim. Health Prod.* 2015; 47(5): 889–894. <https://doi.org/10.1007/s11250-015-0804-9>
7. Lopes L, Eckstein C, Pina D, Carnevalli R. The influence of trees on the thermal environment and behaviour of grazing heifers in Brazilian Midwest. *Trop. Anim. Health Prod.* 2016; 48(4): 755–761. <https://doi.org/10.1007/s11250-016-1021-x>.
8. Piñeros-Barón R, Mora-Delgado J. Índice de temperatura y humedad en una pastura convencional y un sistema agroforestal en el trópico seco de Colombia. *Zootec Trop.* 2015; 33(3):207–216.
9. Martínez R, Gallego J, Onofre G, Pérez J, Vasquez R. Evaluación de la variabilidad y potencial genético de poblaciones de bovinos criollos colombianos. *Anim Genet Resour Inf.* 2009; 44:57–66. <https://doi.org/10.1017/S1014233900002868>.
10. Milani M, Hense A, Rahmani E, Ploeger A. A Pilot Investigation of the Relationship between Climate Variability and Milk Compounds under the Bootstrap Technique. *Foods.* 2015; 4(4):420–439. <https://doi.org/10.3390/foods4030420>
11. Scharf B, Leonard M, Weaber R, Mader T, Hahn G, Spiers D. Determinants of bovine thermal response to heat and solar radiation exposures in a field environment. *Int J Biometeorol.* 2011; 55(4):469–480. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0360-y>.
12. Moretti R, Biffani S, Chessa S, Bozzi R. Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal.* 2017; 11:2320–2325. <https://doi.org/10.1017/S1751731117001173>.
13. Correa-García Z, Campos R, Flórez H. Physiological adaptation indicators of three Colombian Creole cattle breeds. *Rev. Fac. Nac. Agron.* 2022; 75(2): 9951–9960. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v75n2.95718>
14. da Costa A, Feitosa J, Montezuma P, de Souza P, de Araújo A. Rectal temperatures, respiratory rates, production, and reproduction performances of crossbred Girolando cows under heat stress in northeastern Brazil. *Int J Biometeorol.* 2015; 59(11):1647–1653. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0971-4>.
15. Gomes da Silva R, Façanha Morais D, Guilhermino M. Evaluation of thermal stress indexes for dairy cows in tropical regions. *Rev Bras Zootec.* 2007; 36:1192–1198. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982007000500028>
16. Mayer J, Davis J, Purswell J, Koury E, Younan N, Larson J et al. Development and characterization of a continuous tympanic temperature logging (CTTL) probe for bovine animals. *Trans ASABE.* 2016; 59(2):703–714. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11367>
17. Godyń D, Herbut P, Angrecka S. Measurements of peripheral and deep body temperature in cattle – A review. *J Therm Biol.* 2019; 79:42–49. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.11.011>

18. Sellier N, Guettier E, Staub C. A Review of Methods to Measure Animal Body Temperature in Precision Farming. *Am J Agric Sci Technol*. 2014; 2(2):74-99. <https://doi.org/10.7726/ajast.2014.1008>
19. Neethirajan S. Transforming the adaptation physiology of farm animals through sensors. *Animals*. 2020; 10(9):1-24. <https://doi.org/10.3390/ani10091512>
20. Arce A, Tech A, Silva A, Costa E. Monitorización de rebaños de bovinos a través de redes de sensores inalámbricos. *Arch. Zootec*. 2009; 58(222):253-263. <https://doi.org/10.4321/s0004-05922009000200010>
21. Odintsov Vaintrub M, Levit H, Chincarini M, Fusaro I, Giammarco M, Vignola G. Review: Precision livestock farming, automats and new technologies: possible applications in extensive dairy sheep farming. *Animal*. 2021; 15(3):100143. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143>
22. García K, Campos R, Giraldo L. Suplementación vitamínica y mineral como estrategia para reducir la incidencia de cetosis bovina en el trópico bajo. *Rev Colomb Cienc Anim - RECIA*. 2016; 8(2):204-213. <https://doi.org/10.24188/recia.v8.n2.2016.188>
23. Cavestany D, Blanc J, Kulcsar M, Uriarte G, Chilibroste P, Meikle A et al. Studies of the transition cow under a pasture-based milk production system: metabolic profiles. *J Vet Med A Physiol Pathol Clin Med*. 2005; 52(1):1-7. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0442.2004.00679.x>
24. Veléz-terranova M, Molina Benavides R, Sánchez Guerrero H, Campos Gaona R, Perilla S. Influence of climatic conditions on tympanic temperature and milk production in grazing cows. *J Anim Behav Biometeorol*. 2021; 9(2132):1-9. <https://doi.org/10.31893/jabb.21032>
25. R Studio Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020
26. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The Elements of Statistical Learning. *Elements*. 2009; 1: 337-387. <https://doi.org/10.1007/b94608>
27. Gomes da Silva R, Campos Maia A. Principles of Animal Biometeorology. Netherlands. Springer Dordrecht. 2013.
28. Koltjes J, Koltjes D, Mote B, Tucker J, Hubbell D. Automated collection of heat stress data in livestock: New technologies and opportunities. *Transl Anim Sci*. 2018; 2(3):319-323. <https://doi.org/10.1093/tas/txy061>
29. Jara I, Keim J, Arias R. Behaviour, tympanic temperature and performance of dairy cows during summer season in southern Chile. *Arch Med Vet*. 2016; 48(1):113-118. <https://doi.org/10.4067/S0301-732X2016000100014>
30. Hillman P, Gebremedhin K, Willard S, Lee C, Kennedy A. Continuous Measurements of Vaginal Temperature of Female Cattle Using A Data Logger Encased in a Plastic Anchor. *Appl Eng Agric*. 2009; 25(2):291-296. <https://doi.org/10.13031/2013.26332>
31. Martello L, Junior H, Silva S, Titto E. Respostas Fisiológicas e Produtivas de Vacas Holandesas em Lactação Submetidas a Diferentes Ambientes. *R Bras Zootec*. 2004; 33(1):181-191. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982004000100022>
32. Gantner V, Bobic T, Gantner R, Gregic M, Kuterovac K, Novakovic J et al. Differences in response to heat stress due to production level and breed of dairy cows. *Int J Biometeorol*. 2017; 61(9):1675-1685. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1348-7>
33. Ruiz-Jaramillo J, Vargas-Leitón B, Abarca-Monge S, Hidalgo H. Heat stress effect on dairy cattle production in Costa Rica. *Agron Mesoamerican*. 2019; 30(3): 733-750. <https://doi.org/10.15517/am.v30i3.35984>
34. Anzures-Olvera F, Véliz F, de Santiago A, García J, Mellado J, Macías-Cruz U et al. The impact of hair coat color on physiological variables, reproductive performance and milk yield of Holstein cows in a hot environment. *J Therm Biol*. 2019; 81: 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.02.020>
35. Molina R, Silva F, Perilla S, Sánchez H. Caracterización del ambiente térmico para la actividad ganadera bovina en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta Agron*. 2016; 65(4):406-412. <https://doi.org/10.15446/acag.v65n4.49018>
36. Wijffels G, Sullivan M, Gaughan J. Methods to quantify heat stress in ruminants: Current status and future prospects. *Methods*. 2021; 186:3-13. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2020.09.004>