



Estrés calórico en búfalos de agua, una revisión. II. Neuromodulación hipotalámica de la termorregulación

Heat stress in water buffaloes, a review. II. Hypothalamic neuromodulation of thermoregulation

Héctor Pérez Esteban *, Alina Mitat Valdés **, Adela Labrada Velázquez *

*Universidad Agraria de La Habana (UNAH), La Habana, Cuba.

**Asesora independiente, Cuba.

Correspondencia: perezestebanhector51@gmail.com

Recibido: Febrero, 2025; Aceptado: Marzo, 2025; Publicado: Abril, 2025.

RESUMEN

Antecedentes: La crianza del búfalo de agua en zonas tropicales enfrenta una paradoja: su adaptabilidad rústica contrasta con los desafíos fisiológicos para mantener una termorregulación eficiente frente a la combinación de las altas temperaturas ambientales (TA) y la humedad relativa (HR). El impacto de este binomio sobre el ganado se interpreta mejor a través del Índice de Temperatura-Humedad (ITH). Su efecto se potencia por la interacción con otros factores climáticos que incrementan la sensación térmica por calor, que afecta el bienestar animal y reduce el desempeño productivo y reproductivo de este genofondo. Por otra parte, las particularidades anatomofisiológicas de la piel reducen la capacidad de respuesta del sistema termorregulador por estrés calórico (EC) que mejora con la aplicación de sistemas de manejo que propicien el bienestar mediante la disipación del calor corporal frente a la elevación del ITH. Esta condición adversa incrementa la prioridad de energía hacia la neuromodulación hipotalámica para mantener la homeotermia. Es así que, la respuesta fisiológica frente al EC desencadena una reacción de alarma generalizada desde el hipotálamo con reactividad de los sistemas de control que regulan la temperatura corporal del organismo animal. **Objetivo.** Analizar el mecanismo de la neuromodulación hipotalámica que regula la termorregulación desde el enfoque del Síndrome de Adaptación General como respuesta fisiológica integral al estrés calórico en el búfalo de agua. **Desarrollo:** Se analizan las particularidades de la neuromodulación del sistema termorregulador desde la perspectiva integral que proporciona el Síndrome de Adaptación General en la respuesta fisiológica al estrés calórico en el búfalo de agua.

Palabras clave: búfalo de agua, estrés calórico, termorregulación, neuromodulación, síndrome de adaptación general (*Fuente: AIMS*)

Como citar (APA) Pérez Esteban, H., Mitat Valdés, A., & Labrada Velázquez, A. (2025). Estrés calórico en búfalos de agua, una revisión. II. Neuromodulación hipotalámica de la termorregulación. *Revista de Producción Animal*, 37. <https://apm.reduc.edu.cu/index.php/rpa/article/view/e169>



©El (los) autor (es), Revista de Producción Animal 2020. Este artículo se distribuye bajo los términos de la licencia internacional Attribution-NonCommercial 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), asumida por las colecciones de revistas científicas de acceso abierto, según lo recomendado por la Declaración de Budapest, la que puede consultarse en: Budapest Open Access Initiative's definition of Open Access.

ABSTRACT

Background: Water buffalo husbandry in tropical areas faces a paradox: its rustic adaptability contrasts with physiological challenges to maintain efficient thermoregulation in the face of the combination of high ambient temperatures (TA) and relative humidity (RH). The impact of this pairing on livestock is better understood through the Temperature-Humidity Index (THI). Its effect is enhanced by the interaction with other climatic factors that increase heat stress, which affects animal welfare and reduces the productive and reproductive performance on this genotype. On the other hand, the anatomophysiological particularities of the skin reduce the response capacity of the thermoregulatory system due to heat stress (HS), which improves with the application of management systems that promote welfare through the dissipation of body heat facing an elevated THI. This adverse condition increases the priority of energy towards hypothalamic neuromodulation to maintain homeothermia. Thus, the physiological response to the HS triggers a generalized alarm reaction from the hypothalamus with reactivity of the control systems that regulate the body temperature of the animal organism. **Objective.** To analyze the mechanism of hypothalamic neuromodulation that regulates thermoregulation from the approach of the General Adaptation Syndrome as an integral physiological response to heat stress in the water buffalo.

Development: The particularities of the neuromodulation of the thermoregulatory system are analyzed from the integral perspective provided by the General Adaptation Syndrome in the physiological response to heat stress in the water buffalo.

Keywords: water buffalo, heat stress, thermoregulation, neuromodulation, general adaptation syndrome (*Source: AIMS*)

INTRODUCCIÓN

La crianza del búfalo de agua se incrementó a nivel global en las últimas décadas como una alternativa para la producción de alimentos de alto valor biológico destinada al consumo humano (Bertoni *et al.*, 2019). En los países en vías de desarrollo constituye una opción para diversificar la ganadería por su plasticidad para la adaptación a diversos ecosistemas (Bertoni *et al.*, 2021), la recuperación de estos espacios (Bittel, 2022), y la digestibilidad eficiente de pastos con baja calidad que no son viables para la explotación de otras especies (Javed *et al.*, 2022).

La rusticidad del búfalo de agua permite su adaptación con determinada habilidad a las condiciones que caracterizan el trópico húmedo (De León *et al.*, 2022), incluida una mayor capacidad de resistencia frente a las enfermedades infecciosas y parasitarias (Grazziotto *et al.*, 2020).

Sin embargo, son animales susceptibles al EC del trópico (Gonçalves *et al.*, 2021; Petrocchi *et al.*, 2023), a causa de las particularidades morfológicas de la capa de piel (Mitat *et al.*, 2024) que limitan su capacidad para disipar calor por esta vía. La estrategia fisiológica en estas condiciones incrementa la temperatura rectal (TR), la frecuencia cardíaca (FC) y respiratoria (FR) (Younas *et al.*, 2020), induce cambios metabólicos y de la conducta (Athaíde *et al.*, 2020).

En el búfalo de agua se incrementa la FR de 26 a 87 con la elevación de la TA de 27°C a 35°C (Pereira *et al.*, 2020). Si la TA es superior a 40°C el incremento de la FR no es capaz de disipar el calor necesario. Por otra parte, la propia elevación de la FR implica a su vez una desventaja a causa de la mayor producción de calor por los músculos inspiradores/espironadores y el riesgo que representa la alcalosis respiratoria en estas condiciones (Cartwright *et al.*, 2023).

Por ello, la crianza de búfalos de agua en sistemas intensivos debe contemplar instalaciones para promover el confort térmico en el entorno de una TA entre 13,0°C y 24,0°C y HR entre 55 y 60% (Vilela *et al.*, 2022).

El interés creciente para el desarrollo del búfalo de agua en el trópico implica considerar las alternativas fisiológicas necesarias entre la demanda energética del metabolismo y la capacidad termolítica de este genofondo. En este contexto, el Síndrome de Adaptación General y su repercusión sobre la respuesta neuroendocrina del organismo ofrece un enfoque sistémico para evaluar la respuesta del hipotálamo frente al estrés calórico en el búfalo de agua.

La revisión tiene como objetivo analizar el mecanismo de neuromodulación hipotalámica que regula la termorregulación como respuesta fisiológica integral del Síndrome de Adaptación General al estrés calórico en el búfalo de agua.

DESARROLLO

El calentamiento global representa un reto endémico para el ganado (Napolitano *et al.*, 2023) a causa de los factores climáticos que desencadenan el EC en el trópico. El efecto de la interacción entre la elevada TA y la HR (Thornton *et al.*, 2022) caracteriza los países del área de América Latina y El Caribe, donde se reporta el 1,23% de la población mundial del búfalo de agua (Bertoni *et al.*, 2021). En otras condiciones climáticas, el impacto negativo sobre el bienestar animal puede afectar del 10 al 30% de su desempeño productivo (Kiktev *et al.*, 2021).

En este contexto, una parte de los estudios evaluaron la zona de confort térmico a partir del ITH y la capacidad de la neuromodulación hipotalámica para regular la temperatura corporal en el búfalo de agua.

Repercusión del medio ambiente sobre la competencia fisiológica para disipar calor y mantener la homeotermia del búfalo de agua en el trópico: zona de confort térmico e ITH.

El clima del trópico se caracteriza por una elevada y persistente TA, igual o superior a 18°C, una media entre 23°C y 24°C, con una amplitud de 10°C, que puede superar los 31°C a causa de la radiación solar de forma perpendicular o casi perpendicular y una abundante precipitación durante casi todo el año que afecta el bienestar y la producción de leche en el ganado (Geiger *et al.*, 1995). La ubicación geográfica de Cuba, próxima al Trópico de Cáncer, condiciona una elevada radiación solar durante todo el año que eleva la sensación térmica del entorno con una estacionalidad húmeda y mayor TA máxima que oscila entre 20°C y 31°C durante la época lluviosa de mayo a octubre (Instituto de Meteorología de la República de Cuba, 2025). En nuestro país, el clima durante el año 2023 se caracterizó por una temperatura media de 29,25°C, asociada al calentamiento global, con incremento de las precipitaciones y la HR (Fonseca *et al.*, 2024). Estas condiciones constituyen un desafío para el EC en el búfalo por la desventaja que representan las particularidades morfológicas de la piel, caracterizada por su grosor, color negro, abundancia de melanina, baja distribución de folículos pilosos y glándulas sudoríparas que comprometen la disipación de calor (Mitat *et al.*, 2024).

El búfalo de agua posee una capacidad límite para expresar tolerancia al calor hasta una TA de 46°C, aunque no se indicó el valor de la HR en estas condiciones, a pesar de constituir un binomio decisivo para evaluar el EC. No obstante, existen evidencias a favor de la plasticidad termorreguladora de la especie y su elevada capacidad de adaptación a las condiciones del trópico, siempre que pueda sumergirse en zonas inundables y tener acceso a la sombra (Mota-Rojas *et al.*, 2021a). Otras fuentes de variación para la tolerancia al calor están en relación con diferencias raciales, la estrategia fisiológica para mitigar los efectos del EC y las condiciones del medio ambiente (Habimana *et al.*, 2023). Sin embargo, cuando las condiciones del entorno exceden estos indicadores, y la temperatura rectal (TR) del búfalo rebasa el rango fisiológico de 37,5°C a 39°C (Pereira *et al.*, 2020), se desencadena una reacción fisiológica refleja en cadena desde el hipotálamo que involucra el sistema cardiovasomotor, respiratorio, endocrino, la piel y el propio metabolismo, en paralelo con cambios de la conducta (Picón *et al.*, 2020). En este contexto, la modificación en la prioridad de la energía disponible tiene el objetivo de restablecer la homeotermia, prevenir las consecuencias del EC y evitar su impacto sobre el bienestar animal (Trapanese *et al.*, 2024).

En general, se reconoce al búfalo de agua como una especie adaptada a las condiciones del trópico, dentro de su zona de confort térmico que corresponde con una TA entre 13°C a 24° C y una HR que oscila entre 55% y 60% (Vilela *et al.*, 2022).

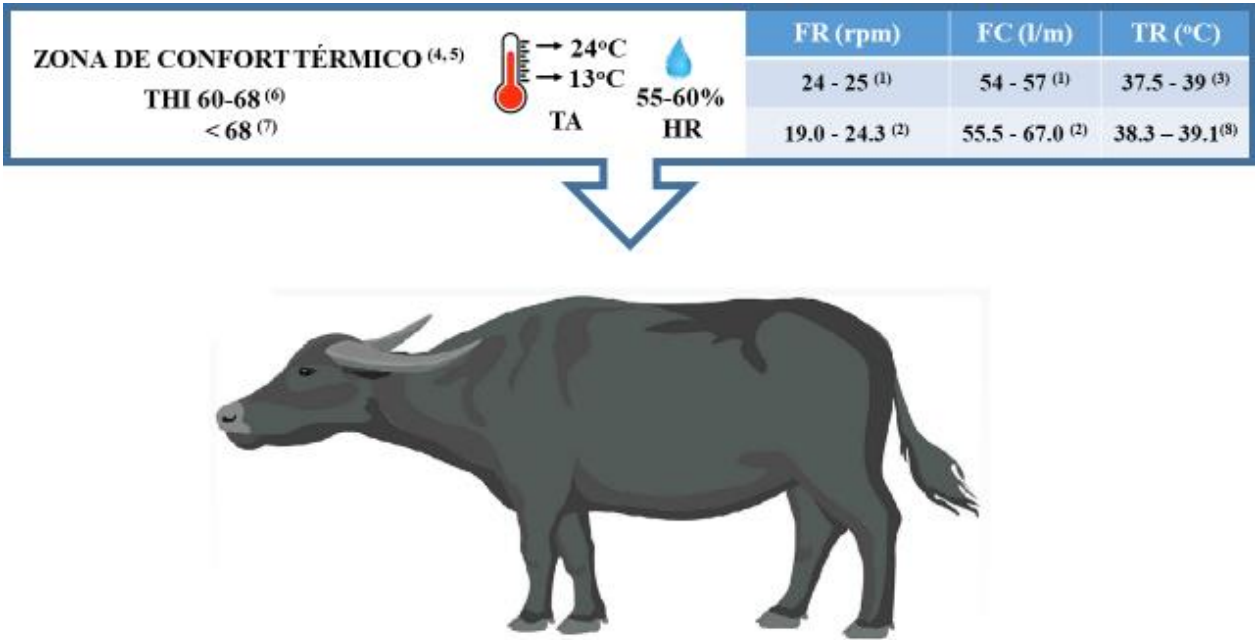


Figura 1. Indicadores fisiológicos en la zona de confort térmico del búfalo de agua.

En este contexto, el ITH es un indicador que se utiliza frecuentemente, para evaluar el impacto fisiológico del EC en el ganado. Su elevación en el búfalo por encima de 67 a 70 provoca un incremento significativo ($p < 0,05$) de la TR, la FR, la FC incluida la termólisis por las vías

insensibles y sensibles, (Sharma *et al.*, 2023) al rebasar la zona de confort térmico para esta especie. Es así que, el intento por elevar la pérdida de calor desencadena el arco reflejo de la neuromodulación hipotalámica para regular la temperatura corporal.

Neuromodulación hipotalámica del sistema termorregulador.

Los seres vivos son un sistema abierto que intercambia y transforma materia y energía con su entorno. El subsistema que regula la temperatura corporal de los animales endodermos desarrolla la termólisis a través de dos modalidades según las condiciones climáticas de su entorno. Siempre que la temperatura corporal supere la del medio ambiente los animales disipan calor por radiación, convección y conducción. Sin embargo, cuando la temperatura del entorno supera la temperatura corporal la termólisis evaporativa constituye la opción para conservar la homeotermia.

A pesar de que el gradiente entre la temperatura de núcleo, la piel y el medio ambiente es el fenómeno físico que determina la activación de la neuromodulación hipotalámica para mantener la homotermia del organismo, no se explicita con frecuencia en las revisiones que abordan esta temática.

Bases neurofisiológicas

La neuromodulación refleja, en el búfalo de agua, desencadena una respuesta fisiológica propia de la especie cuando los termorreceptores sensibles al calor detectan el incremento de la TA (Mota-Rojas *et al.*, 2021b). La piel de los mamíferos posee una rica inervación simpática con una amplia dotación de receptores térmicos periféricos, representados por los Corpúsculos de Ruffini, localizados en la dermis y termorreceptores centrales localizados en los grandes vasos, las vísceras, la medula espinal y la zona preóptica del hipotálamo (POA) para la regulación de la temperatura de núcleo (Picón *et al.*, 2020). La familia de canales catiónicos de receptor de potencial transitorio (TRP's) se localizan en la dermis para la percepción de la TA y las señales a nivel celular (Zhang *et al.*, 2023). Los receptores de tipo TRPV1 y TRPV2 son sensibles a la elevación drástica del calor, mientras que el TRPV3 y TRPV4 perciben los cambios de temperatura en un rango inocuo para los mamíferos (Lezama *et al.*, 2022). De ellos, predominan en la dermis los receptores vaniloides (TRPV, TRPV1, TRPV2, TRPV3, TRPV4) que inician la respuesta termorreguladora mediante la vasodilatación periférica en el búfalo (Napolitano *et al.*, 2023).

El incremento de la TA provoca la despolarización de los receptores termosensibles de la piel que generan el potencial de acción del impulso aferente que llega a las láminas del asta dorsal de la médula espinal. El impulso nervioso discurre por el fascículo espinotalámico, el trigémino y los cordones anterolaterales de la médula. Mientras que para los termorreceptores centrales las vías aferentes son los fascículos de Goll y Burdach, el espinotalámico, fibras vegetativas y los cordones anterolaterales de la médula espinal (Picón *et al.*, 2020). El impulso nervioso transita hasta el núcleo parabraquial y el mesencéfalo para alcanzar el hipotálamo donde se proyecta en las neuronas sensibles al calor del área preóptica (POA) del centro termorregulador hipotalámico (Bienboire *et al.*, 2023). El POA del hipotálamo posee entre 30 a 40% de neuronas termosensibles que se excitan al recibir la señal de los termorreceptores periféricos y centrales cuando se incrementa la

temperatura del medio ambiente (Lezama *et al.*, 2022). De esta forma, el centro termorregulador integra la señal aferente nerviosa periférica y central en la respuesta del organismo como un todo para conservar la homotermia, que incluye la interacción entre el hipotálamo, el sistema límbico y la corteza (Sanmiguel y Díaz, 2011). A partir de aquí, el elevado grado de integración para la neuromodulación hipotalámica de la termorregulación se activa por la repercusión del EC sobre el organismo. Esta respuesta posee dos alternativas: La vía refleja en los niveles superficial y profundo (Gómez *et al.*, 2022) para el balance energético/actividad metabólica de la homeotermia y la vía consciente para la termorregulación por la percepción cortical que traduce una acción volitiva termolítica con cambios de la conducta al salir de la zona de confort térmico.

Las vías eferentes vegetativas emergen del POA del hipotálamo para alcanzar los órganos efectores. En sentido general, se refiere como órgano efector del arco reflejo para la termólisis a la piel que integra la doble función receptor/efector, donde la vasodilatación periférica se refuerza con la sudoración (Mota-Rojas *et al.*, 2021b) para promover la pérdida insensible y sensible de calor. La propia vasodilatación periférica estimula en paralelo la taquicardia y la polipnea térmica que refuerza la termólisis (Chikkagoudara *et al.*, 2022). La evidencia experimental indica que el búfalo de agua recurre en primera instancia a la vasodilatación (García *et al.*, 2023) que emplea con mayor intensidad y frecuencia para la termólisis con evaporación durante períodos más prolongados al comparar con el ganado *Bos taurus* (Pereira *et al.*, 2020). Los propios autores manifestaron, en igual comparación, una mayor frecuencia de signos de EC por jadeo (+29%), protrusión de la lengua (+27%) y extensión del cuello (+27%) a favor del ganado bubalino.

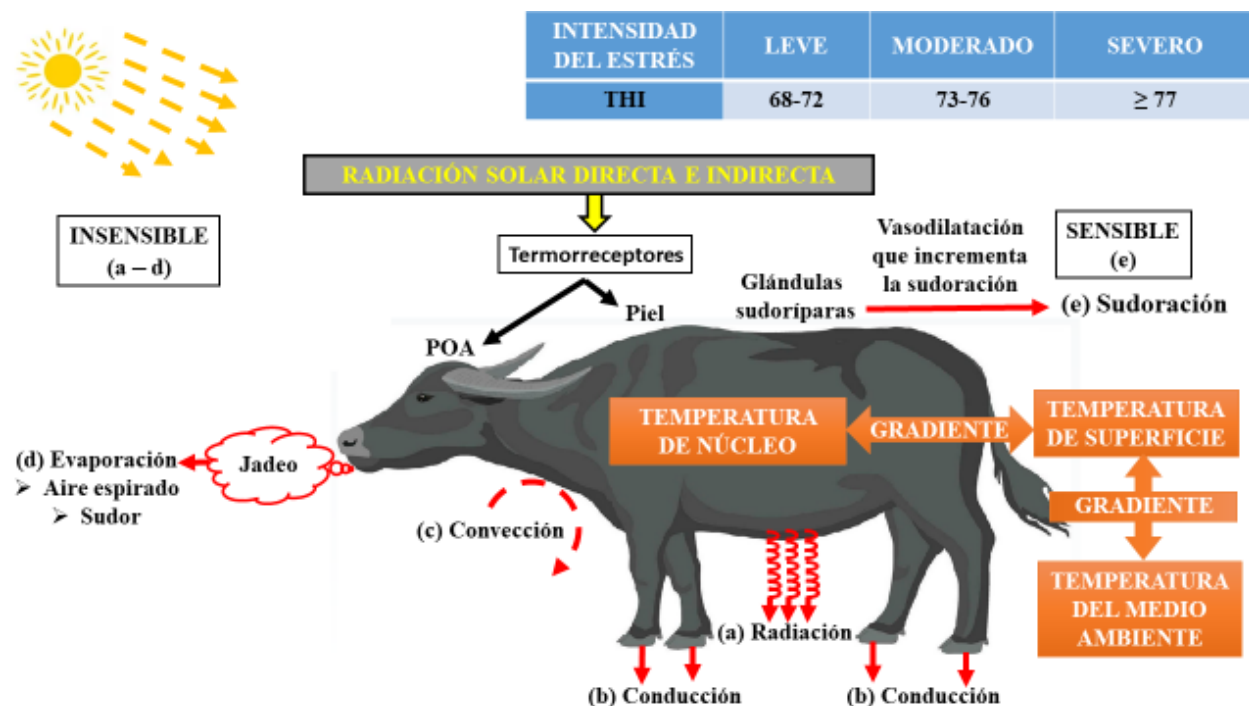


Figura 2. Activación de las vías termolíticas insensibles (a-d) y sensibles (e) en el EC por incremento del ITH en el búfalo de agua.

Por otra parte, el búfalo de agua tiene como desventaja una baja capacidad de sudoración a causa de la escasa distribución de glándulas sudoríparas en la piel (Mitat *et al.*, 2024). Sin embargo, es reducida la información disponible sobre la tasa de sudoración en esta especie que confiere, como valor agregado, valorar su competencia para la transpiración en la búsqueda de genofondos con mayor tolerancia al calor en las condiciones del trópico.

Síndrome de Adaptación General (GAS)

Los estudios que abordan la neuromodulación hipotalámica de la termorregulación del ganado bubalino, no enfocan de forma integral el Síndrome General de Adaptación (GAS) en este contexto (Selye, 1973), la respuesta global del sistema endocrino, la base neurofisiológica del incremento paralelo de la actividad del centro bulbar respiratorio y cardiovasomotor vinculada al POA del hipotálamo y la perspectiva integral de la doble función de la piel como órgano receptor/efector.

- **Fases del GAS**

Reacción de alarma

En el desarrollo del GAS, durante la "Reacción de Alarma", el animal responde con un mecanismo de adaptación inmediata por incremento de catecolaminas mediante activación y descarga de noradrenalina del locus coeruleus y del eje hipotálamo simpático meduloadrenal (HSMA). El efecto consecutivo se caracteriza por elevación de la FR y FC, vasoconstricción, midriasis, angustia y sufrimiento. Estas acciones vinculadas al sistema límbico y la corteza determinan un cambio de la conducta para preservar la salud y el bienestar animal (Damián *et al.*, 2020) a través de acciones de neuromodulación consciente que refuerzan la vía refleja.

Fase de Resistencia

Es así que la fase de "Resistencia" posibilita un proceso de adaptación más duradero con participación de los glucocorticoides y otras hormonas. En esta fase se define la estrategia termorreguladora del búfalo de agua a causa del EC. En paralelo, el cortisol produce efectos adversos caracterizados por reducción de la inmunocompetencia con incremento de la incidencia de enfermedades que afectan el bienestar y la productividad del ganado (Chucuri *et al.*, 2023).

Por otra parte, el alcance del EC en el búfalo de agua repercute sobre bioindicadores hormonales de estrés que cierran el circuito de la neuromodulación hipotalámica de la termorregulación con elevación de las catecolaminas, el cortisol, la vasopresina y la reducción del perfil de secreción tiroideo.

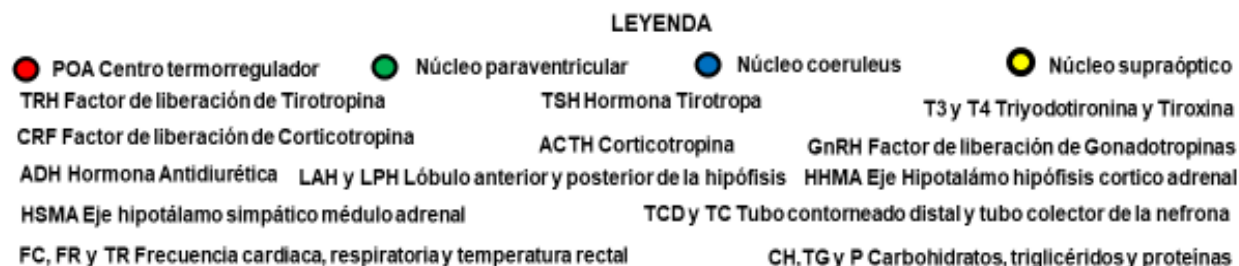
En el búfalo la activación del locus coeruleus y el eje hipotálamo hipófisis corticoadrenal (HHCA) frente al EC con ITH superior a 82 eleva la concentración periférica de cortisol y el estrés oxidativo (Li *et al.*, 2020) que promueve el catabolismo de los carbohidratos, proteínas y lípidos para disponer de energía y compensar la reducción de la ingesta en esa situación (Irreño *et al.*, 2022). En concordancia con ello, López *et al.* (2021) informaron en ganado lechero de la raza Holstein niveles más elevados ($p < 0,05$) de cortisol capilar $51,52 \pm 5,52$ pg/mg como expresión del efecto crónico del EC en el período agosto/septiembre cuando el ITH alcanzó el valor más elevado.

Además, la vasopresina del núcleo paraventricular del hipotálamo favorece la disipación de calor, por la vía evaporativa y no evaporativa, frente a los cambios de la presión osmótica de los líquidos corporales y la filtración renal (Romero *et al.*, 2011).

Las hormonas tiroideas (HT) Tiroxina (T_4) y Triyodotironina (T_3) tienen una participación decisiva en la regulación de la temperatura corporal por su efecto calorigénico al elevar la tasa metabólica por incremento del consumo de oxígeno mitocondrial, la remodelación del metabolismo y el aporte de energía a los tejidos. Las neuronas del núcleo paraventricular (NPV) del propio hipotálamo decodifican señales internas/externas vinculadas al metabolismo energético y la termogénesis/termólisis que traduce el factor de liberación de tirotropina (TRH). De esta forma, regula el eje hipotálamo-hipófisis-tiroides (HHT) para la descarga de HT. En consecuencia, el incremento de la TA ($34 \geq 40^\circ\text{C}$) reprime la descarga de TRH que a su vez inhibe el eje hipotálamo/hipófisis/tiroides (HHT) en un intento por reajustar la tasa metabólica y la homeotermia (Kahl *et al.*, 2015). La reducción consecutiva de la concentración plasmática de T_3 , que posee mayor actividad biológica al comparar con la T_4 , se relaciona con la capacidad para la tolerancia al EC del ganado (Pereira *et al.*, 2008). En un estudio comparado entre búfalos Nili-Ravi y novillas *Bos taurus* de la raza Holstein que evaluó el efecto de la sombra artificial, el empleo de duchas y la convección forzada se encontró, no solo una diferencia significativa ($p < 0,05$) con menor temperatura de la piel, FR y FC, sino, además, una concentración plasmática más elevada de HT a favor de los búfalos (Younas *et al.*, 2020). Con antelación se conoció que el ITH, la TR y la FR fueron más elevados y los niveles periféricos de HT inferiores ($p < 0,05$) durante la época de lluvia, que representa el máximo EC en novillas de la raza Holstein en las condiciones del trópico cubano. En el propio estudio, al agrupar las novillas con mejor capacidad termorreguladora (55,5% del total, según la TR, la FR y FC), se encontró correspondencia con niveles circulantes medios (22,2%) y altos (33,3%) de T_3 (Pérez, 2000). Ello significa que esta hormona permitió discriminar dos estrategias de respuesta en las novillas que expresaron mejor tolerancia al calor. A partir de aquí, la termorregulación en relación con el consumo de oxígeno a nivel celular se relaciona con el metabolismo tiroideo, la TA y la TR en una ruta paralela, aunque existan mecanismos compensadores para modelar la termólisis a través de la vasodilatación periférica, la FR y FC y la tasa de sudoración.

La fase de recuperación proporciona una matriz integral para comprender y evaluar en mejores condiciones el incremento de la pérdida y la reducción de la producción de calor y sus consecuencias en el ganado bubalino en atención a las ventajas/desventajas que caracterizan este genofondo y su adaptación en el escenario del trópico. El EC crónico produce inmunodepresión, afecta la eficiencia productiva/reproductiva y produce vulnerabilidad del ganado (Sanmiguel y Díaz, 2011).

Lamentablemente, la mayor parte de la información disponible que vincula el impacto del EC sobre las HT en el búfalo de agua solo se limita a señalar su efecto sobre la glándula (Pérez *et al.*, 2000) o la diferencia de la concentración sérica total de T_4 o T_3 de acuerdo con las condiciones experimentales (Younas *et al.*, 2020). El estudio circadiano, estacional, individual y en diferentes



Existe congruencia en cuanto a que el búfalo de agua es una especie tolerante al calor y adaptada al trópico. Sin embargo, cuando el ITH rebasa el límite se disparan los mecanismos de la neuromodulación hipotalámica para la disipación de calor por todas las vías, con el agravante de las ventajas/desventajas para la termólisis en este genofondo (Mota-Rojas *et al.*, 2023). En este punto resulta crucial la crianza del búfalo en sistemas de producción con acceso a la sombra y la inmersión en el agua para mitigar el EC con el objetivo de garantizar el bienestar térmico. Por otra parte, los sistemas de producción enriquecidos aproximan el bienestar animal al comportamiento innato de la especie a favor de la congruencia entre las condiciones sostenibles de explotación y el propósito productivo que pudiera mejorar los índices reproductivos y la producción de carne y leche de búfalo en el trópico (El Sabry y Almasri, 2022).

En estas condiciones el EC se asocia con una reducción de la ingestión de alimentos, cambios metabólicos y susceptibilidad a enfermedades (Trapanese *et al.*, 2024). En la hembra en lactación puede aumentar la presentación de mastitis y afectarse la cantidad y calidad de la leche (Napolitano *et al.*, 2020). La información disponible indica que se debe profundizar en la importancia de modificar el entorno para mitigar el efecto de la elevada temperatura y la radiación solar directa sobre el bienestar del búfalo de agua y su eficiencia productiva y reproductiva en el trópico.

Otra alternativa consiste en el desarrollo de genofondos con mejor tolerancia al calor en las condiciones del trópico. Esta perspectiva es pertinente, sin perder de vista que la selección de razas altas productoras en el trópico implica que, en paralelo, debe existir correspondencia entre la máxima capacidad productiva del genofondo apropiado y las condiciones medio ambientales y de manejo.

Toda la estrategia fisiológica descrita del sistema endocrino como regulador de las funciones corporales refuerza la respuesta de adaptación frente al EC en el ganado. Si tenemos en cuenta el protagonismo del sistema endocrino en la neuromodulación hipotalámica de la homeotermia, entonces sería más abarcador referirse a la modulación neuroendocrina en lugar de la neuromodulación como se acostumbra a designar.

CONCLUSIONES

La neuromodulación de la termorregulación del búfalo de agua constituye un mecanismo fisiológico de elevada complejidad por la interacción entre el hipotálamo, el sistema nervioso y endocrino y la propia capacidad de la especie para modular la temperatura corporal en las

condiciones del trópico. La neuromodulación hipotalámica de la termorregulación desde el "Síndrome de Adaptación General" revela un enfoque más abarcador de la interacción neuroendocrina que permite enfrentar el efecto crónico del estrés calórico en detrimento del desempeño metabólico y productivo del búfalo. A pesar de la plasticidad de este genofondo para mantener el balance de la homeotermia en las condiciones del trópico, es imprescindible la aplicación de buenas prácticas que mitiguen la sobrecarga del estrés calórico para proveer el bienestar animal que se traduce en incremento de la eficiencia productiva y reproductiva.

REFERENCIAS

- Athaíde, L.G., Joset, W.C.L., de Almeida, J.C.F., Pantoja, M.H., Noronha, R.P.P., Bezerra, A.S., Barbosa, A.V.C., Martorano, L.G., da Silva, J.A.R., & Lourenço, J.B. (2020). Thermoregulatory and behavioral responses of buffaloes with and without direct sun exposure during abnormal environmental condition in Marajó Island, Pará, Brazil. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 522551. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.522551>
- Bertoni, A., Álvarez, A., & Mota-Rojas, D. (2019). Desempeño productivo de los búfalos y sus opciones de desarrollo en las regiones tropicales *Sociedades rurales, producción y medio ambiente* 19(38). <https://www.researchgate.net/publication/346220938>
- Bertoni, A., Álvarez, A., Mota-Rojas, D., Dávalos, J. L., & Minervino, A.H.H. (2021). Dual-Purpose Water Buffalo Production Systems in Tropical Latin America: Bases for a Sustainable Model. *Animals*, 11(10), 2910. <https://doi.org/10.3390/ani11102910>
- Bienboire, C., Wang, D., Marcet, M., Villanueva, D., Gazzano, A., Domínguez, A., Olmos, A., Hernández, I., Lezama, K., Verduzco, A., Gómez, J., & Mota-Rojas, D. (2023). The role of brown adipose tissue and energy metabolism in mammalian thermoregulation during the perinatal period. *Animals*, 13(13), 2173. <https://doi.org/10.3390%2Fani13132173>
- Bittel, J. (2022). Donde habitan los búfalos, prosperan los ecosistemas en peligro de extinción. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/animales/2022/08/donde-habitan-los-bufalos-prosperan-los-ecosistemas-en-peligro-de-extincion>.
- Cartwright, S. L., Schmied, J., Karrow, N., & Mallard, B. A. (2023). Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: a review. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1198697. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1198697>
- Chikkagoudara, K.P., Singh, P., Bhatt, N., Barman, D., Selvaraj, R., Lathwal, S.S., Singh, S.V., Choudhary, S., & Uddin, J. (2022). Effect of heat stress mitigations on physiological, behavioural, and hormonal responses of Buffalo calves. *International Journal of Biometeorology* 66(5), 995–1003. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02255-9>
- Chucuri, S. T., Naula, T. P., & Rivera, J. X. (2023). Cortisol como hormona de estrés y su relación con las inmunoglobulinas A y E. *Anatomía Digital*, 6 (4), 6-21. <https://doi.org/10.33262/anatomiadigital.v6i4.2703>

- Correa, A., Avendaño, L., López, M., & Macías, U. (2022). Estrés por calor en ganado lechero con énfasis en la producción de leche y los hábitos de consumo de alimento y agua. Revisión. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 13(2), 488-509. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v13i2.5832>
- Damián, M. Á., Aguirre, V., Orihuela, A., Pedernera, M., Rojas, S., & Olivares, J. (2020). Tiempo de manejo y algunas conductas relacionadas con el estrés al manejar grupos grandes o reducidos de ganado en mangas rectas. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(3), 905-913. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i3.5127>
- De León, R.H., Abrego, S., Espinoza, A., Vega, N., & González, V. Estacionalidad de los partos en búfalos (*Bufalypso*) en el trópico bajo panameño. (2022). *Ciencia Agropecuaria*. No. 34:91-104. enero-junio <https://www.revistacienciaagropecuaria.ac.pa/index.php/cienciaagropecuaria/article/download/587/471>
- El Sabry, M.I., & Almasri, O. (2022). Space allowance: a tool for improving behavior, milk and meat production, and reproduction performance of buffalo in different housing systems: a review. *Trop Anim Health Prod.* 54:266Vol.:(0123456789)1 3. <https://doi.org/10.1007/s11250-022-03247-y>
- Fonseca, C., García, A., Velázquez, B., Gómez, D., Martínez, M., González, I., Cutié, V., Vázquez, R., Pérez, R., Mitrani, I., Hidalgo, A., Cabrales, J., Leyva, L., & González, E. (2024). Estado del Clima en Cuba 2023. Resumen ampliado *Revista Cubana de Meteorología*, 30 (1), e09. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=701977979009>
- García, A. R., Silva, L. K. X., Barros, D. V., Lourenço, J. B., Martorano, L. G., Lisboa, L. S. S., Silva, J. A. R., Sousa, J. S., & Silva, A. O. A. (2023). Key points for the thermal comfort of water buffaloes in Eastern Amazon. *Ciência Rural* 53, e20210544. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210544>
- Geiger, R., Aron, R. H., Todhunter, P., Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (1995). Interrelations of animals and humans to the microclimate. *The Climate Near the Ground. Vieweg+Teubner Verlag*, 407-455. https://doi.org/10.1007/978-3-322-86582-3_9
- Gómez, J., Pereira, A.M., Wang, D., Villanueva, D., Domínguez, A., Mora, P., Hernández, I., Martínez, J., Casas, A., Olmos, A., Ramírez, R., Verduzco, A., Hernández, A., Torres, F., & Mota-Rojas, D. (2022). Thermoregulation mechanisms and perspectives for validating thermal windows in pigs with hypothermia and hyperthermia: An overview. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 1023294. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1023294>
- Gonçalves, A. A., Garcia, A. R., Rolim, S. T., Silva, J. A. R., Melo, D. N., Guimarães T. C., Tavares H. R., Silva, T. V. G., Souza, E. B., & Santos, S. D. (2021). Scrotal thermoregulation and sequential sperm abnormalities in Buffalo bulls (*Bubalus Bubalis*) under short-term heat stress. *Journal of Thermal Biology*, 96, 102842. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102842>

- Grazziotto, N. M., Maidana, S. S., & Romera, S. A. (2020). Susceptibilidad de los búfalos de agua frente a diferentes enfermedades infecciosas. *Revista Veterinaria*, 31(2), 215-223. <https://dx.doi.org/10.30972/vet.3124750>
- Habimana, V., Nguluma, A. S., Nziku, Z. C., Ekine-Dzivenu, C. C., Morota, G., Mrode, R., & Chenyambuga, S. W. (2023). Heat stress effects on milk yield traits and metabolites and mitigation strategies for dairy cattle breeds reared in tropical and sub-tropical countries. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1121499. <https://doi.org/10.3389/fvets.2023.1121499>
- Instituto de Meteorología de la República de Cuba. (2025). El Clima de Cuba. Características generales. Centro del Clima. <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=CLIMAC&TB2=/clima/ClimaCuba.htm>
- Irreño, F. J., Escorcía, N. S., Navarro, G. Mauricio, M., Navas, L., Domínguez, J. C., & Cala, D. L. (2022). Avances recientes en el estudio de factores de estrés prefaenado sobre la calidad de la carne bovina, aviar y porcina. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 249-264. Epub 08 de agosto de 2022. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.023>
- Javed, K., Salman, M., Sharif, M., Muneer, H., Muzammal, U., Najam, T., & Iqbal, U. (2022). Nutritional Requirements of Dairy Buffalo. *Brazilian Journal of Science*, 1(9), 1-8. - ISSN 2764-3417. <https://periodicos.cerradopub.com.br/bjs/index>
- Kahl, S., Elsasser, T. H., Rhoads, R. P., Collier, R. J., & Baumgard, L. H. (2015). Environmental heat stress modulates thyroid status and its response to repeated endotoxin challenge in steers. *Domestic Animal Endocrinology*, 52, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.domaniend.2015.02.001>
- Kiktev, N., Lendiel, T., Vasilenkov, V., Kapralyuk, O., Hutsol, T., Glowacki, S., Kubon, M. & Kowalczyk, Z. (2021). Automated Microclimate Regulation in Agricultural Facilities Using the Air Curtain System. *Sensors*, 21(24), 8182. <https://doi.org/10.3390/s21248182>
- Lezama, K., Mota-Rojas, D., Pereira, A. M., Martínez, J., Ghezzi, M., Domínguez, A., Gómez, J. A., Lendez, P., Hernández, I., Falcón, I., Olmos, A., & Wang, D. (2022). Transient Receptor Potential (TRP) and thermoregulation in animals: Structural biology and neurophysiological aspects. *Animals*, 12(1), 106. <https://doi.org/10.3390/ani12010106>
- Li, M., Hassan, F. U., Guo, Y., Tang, Z., Liang, X., Xie, F., Peng, L., & Yang, C. (2020). Seasonal dynamics of physiological, oxidative and metabolic responses in non-lactating Nili-Ravi buffaloes under hot and humid climate. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 622. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00622>
- López, E., Albarrán, F. I., Ramírez, J., Bañuelos, B., & Cruz, A. (2021). Índice de Temperatura y Humedad (THI) respaldado por el cortisol capilar en ganado lechero para la medición de estrés calórico crónico. *Nova Scientia*, 13 (27). <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2811>

- Mitat, A., Labrada, A., & Pérez, H. (2024). Estrés calórico en búfalos de agua, una revisión. I. Efectos del clima en Cuba y particularidades morfológicas de la piel. *Revista de Producción Animal*, 36 (2). <https://amp.reduc.edu.cu/index.php/rpa/article/view/e157>
- Mota-Rojas, D., Gonçalves, C., Orihuela, A., Martínez, J., Gómez, J., Torres, F., Flores, K., Carvajal, V., Wang, D., Fuente, V. C., & Wang, D. (2021a). Physiological and behavioral mechanisms of thermoregulation in mammals. *Animals*, 11(6), 1733. <https://doi.org/10.3390/ani11061733>
- Mota-Rojas, D., Napolitano, F., Braghieri, A., Guerrero, I., Bertoni, A., Martínez, J., Monterrosa, C. R., Gómez, J., Ramírez, E., Bribiesca, E., Barrios, H., José, N., Álvarez, A., Mora, P., & Orihuela, A. (2021b). Thermal biology in river buffalo in the humid tropics: Neurophysiological and behavioral responses assessed by infrared thermography. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 9(1), 2103. <http://dx.doi.org/10.31893/jabb.21003>
- Mota-Rojas, D., Napolitano, F., Wang, D., Sarubbi, J., Ghezzi, M., Ceriani, M. C., Orihuela, A., Domínguez, A., Abd El-Aziz, A. H., Geraldo, A. M., Alfredo, M. F. Pereira, A., Braghieri, A., Lendez, P., Casas, A., Bertoni, A., & Strappini, A. C. (2023). Aplicaciones clínicas y factores involucrados en la validación de ventanas térmicas utilizadas en termografía infrarroja en ganado vacuno y búfalo de agua para evaluar la salud y productividad. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/244662>
- Napolitano, F., Mota, D., Álvarez, A., Braghieri, A., Mora, P., Bertoni, A., Cruz, R. & De Rosa, G. (2020). Factores productivos y su incidencia en el bienestar de la búfala lechera en sistemas de producción extensivos e intensivos: una revisión. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente Año 2020 Vol.20 Núm 40*. <https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma/article/download>
- Napolitano, F., De Rosa, G., Chay, A., Álvarez, A., Pereira, A. M. F., Bragaglio, A., Mora, P., Rodríguez, D., García, R., Hernández, I., Domínguez, A., Pacelli, C., Sabia, E., Casas, A., Reyes, B., & Braghieri, A. (2023). The Challenge of Global Warming in Water Buffalo Farming: Physiological and Behavioral Aspects and Strategies to Face Heat Stress. *Animals*, 13 (19), 3103. <https://doi.org/10.3390/ani13193103>
- Pereira, A. M. F., Baccari, F., Titto, E. A., & Almeida, J. A. (2008). Effect of thermal stress on physiological parameters, feed intake and plasma thyroid hormones concentration in Alentejana, Mertolenga, Frisian and Limousine cattle breeds. *International Journal of Biometeorology*, 52, 199-208. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0111-x>
- Pereira, A. M. F., Vilela, R. A., Titto, C. G., Leme, T. M. C., Geraldo, A. C. M., Balieiro, J. C. C., Calviello, R. F., Birgel, E. H., & Titto, E. A. L. (2020). Thermoregulatory responses of heat acclimatized buffaloes to simulated heat waves. *Animals*, 10 (5), 756. <https://doi.org/10.3390/ani10050756>

- Pérez, H. (2000). Concentraciones séricas de hormonas tiroideas en la hembra Holstein como expresión de su capacidad adaptativa frente a condiciones cálido húmedas. (Tesis doctoral, Universidad Agraria de La Habana). <https://orcid.org/0009-0009-0260-977X>
- Petrocchi, F., Evangelista, C., Basiricò, L., & Bernabucci, U. (2023). Responses of dairy Buffalo to heat stress conditions and mitigation strategies: a review. *Animals*, 13 (7), 1260. <https://doi.org/10.3390/ani13071260>
- Picón, Y. A., Orozco, J. E., Molina, J., & Franky, M. P. (2020). Control central de la temperatura corporal y sus alteraciones: fiebre, hipertermia e hipotermia. *MedUNAB* 23(1), 118-130. <http://hdl.handle.net/20.500.12749/9912>
- Romero, P., Marlyn, H., Uribe, L. F., & Sánchez, J. A. (2011). Biomarcadores de estrés como indicadores de bienestar animal en ganado de carne. *Biosalud*, 10 (1), 71-87. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/biosalud/article/view/4753>
- Sanmiguel, R. A., & Díaz, V. (2011). Mecanismos fisiológicos de la termorregulación en animales de producción. *Revista Colombiana de Ciencia Animal*, 4 (1). <http://repository.ut.edu.co/handle/001/1302>
- Selye, H. (1973). The evolution of the stress concept: The originator of the concept traces its development from the discovery in 1936 of the alarm reaction to modern therapeutic applications of syntoxic and catatoxic hormones. *American Scientist*, 61(6), 692–699. <https://www.jstor.org/stable/27844072>
- Sharma, S., Sharma, V., Konwar, D., Khan, A., Kumar, D., & Brahma, B. (2023). A comparative study on effect of heat stress on physiological and cellular responses of crossbred cattle and riverine buffalo in subtropical region of India. *International Journal of Biometeorology*, 67(10), 1619-1628. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02523-2>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M., (2022). Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6 (3), e192-e201. <https://www.thelancet.com/action/showPdf?pii=S2542-5196%2822%2900002-X>
- Trapanese, L., Petrocchi, F., Bifulco, G., Pasquino, N., Bernabucci, U., & Salzano, A. (2024). Buffalo welfare: a literature review from 1992 to 2023 with a text mining and topic analysis approach. *Italian Journal of Animal Science*, 23(1), 570-584. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2024.2333813>
- Vilela, R. A., Lourenço, M. A. C., Barbosa, A. V. C., Pantoja, M. H., Oliveira, C. M. C., & García, A. R. (2022). Dynamics of thermolysis and skin microstructure in water buffaloes reared in humid tropical climate—a microscopic and thermographic study. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 871206. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.871206>
- Younas, U., Abdullah, M., Bhatti, J. A., Ahmed, N., Shahzad, F., Idris, M., Tehseen, M., Tehseen, S., & Ahmed, S., (2020). Biochemical and physiological responses of Nili-Ravi Buffalo

(*Bubalus bubalis*) to heat stress. *Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences*, 44(6), 1196-1202. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.871206>

Zhang, M., Ma, Y., Ye, X., Ning, N., Lei, L., & Wang, B. (2023). TRP (Transient receptor potential) ion channel family: structures, biological functions and therapeutic interventions for diseases. *Signal Transduction and Targeted Therapy* 8, 261. <https://doi.org/10.1038/s41392-023-01464-x>

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Concepción y diseño de la investigación: HPE, AMV, ALV; análisis e interpretación de los datos: HPE, AMV, ALV; Redacción del artículo: HPE, AMV, ALV.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existen conflicto de intereses.