



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
Facultad de Veterinaria



Grado de Veterinaria

Trabajo Fin

de Grado

**¿TIENEN LAS RAYAS DE LA CEBRA
UN PAPEL TERMORREGULADOR?
ANÁLISIS TERMOGRÁFICO.**

**ARE ZEBRA STRIPES A THERMOREGULATORY
ROLE? THERMOGRAPHIC ANALYSIS**

AUTOR:

Juan Carlos Herrejón Teodoro

DIRECTORES:

Evangelina Roderó Serrano

Rafael Guerra Caro

RESUMEN

El papel adaptativo de la singular capa rayada de las cebras ha sido un tema muy debatido. En este trabajo se ha querido realizar una revisión bibliográfica sobre la explicación a las rayas de las cebras y evaluar experimentalmente su posible papel termorregulador. Para esto último hemos realizado el registro termográfico de una cebra común (*equus quagga*) en el Parque Zoológico Municipal de Córdoba, evaluando las posibles diferencias térmicas entre las regiones corporales de la cebra y entre los diferentes diseños de rayas (patrones), y analizar el efecto de los cambios ambientales sobre la temperatura de la superficie corporal del animal.

Los resultados pusieron de manifiesto las diferencias de temperatura entre las rayas de un color o de otro, entre las distintas regiones corporales ($p < 0,05$), y entre un lado y otro del animal, apuntando a que no hay una clara simetría bilateral térmica, La temperatura registrada en las regiones estaba en función de la ambiental, pero las diferencias encontradas entre regiones no pueden ser relacionadas con el patrón de rayas que presentan. Tampoco las temperaturas encontradas en las rayas blancas y negras resultaron suficientes para que se generasen corrientes de convección de efecto refrescante entre ellas. Nuestros resultados no han permitido atribuir un papel de la capa rayada en la termorregulación del animal.

Palabras clave: termografía, cebra, rayas, capa, termorregulación

ABSTRACT

The adaptive role of singular zebras striped coat has been a hot topic. This paper has sought to conduct a literature review on the explanation to the stripes of zebras and experimentally evaluate its possible role thermoregulator. For this last we made a common Zebra (*equus quagga*) thermographic registry in Municipal Zoological Park of Cordoba, evaluating the possible thermal differences between the parts of the body of zebra and different designs stripes (patterns), and examine the effect of environmental changes on the temperature of the body surface of the animal.

Results have highlighted the differences in temperature between colour or of other stripes between the different parts of the body ($p < 0,05$), and between one side and another animal, pointing out that there is a clear thermal bilateral symmetry, the temperature registered in the regions it was according to the environmental, but differences between regions may not be related with the pattern of stripes that present. Temperatures found in the black and white stripes were not enough so refreshing effect including convection currents are generated. Our results have failed to attribute a coating paper scratched in the thermoregulation of the animal.

Key words: thermography, zebra, stripes, temperature, thermoregulation

ÍNDICE	Pág
1. INTRODUCCIÓN.....	5
A. Las distintas especies de cebra	5
B. Formación de la capa rayada	7
C. Los diferentes diseños de los patrones rayados de la capa de las cebras	8
D. Explicaciones al papel adaptativo de las capas de las cebras	12
D.1. Cohesión social e identificación entre miembros del grupo.	12
D.2. Defensa frente a los depredadores	13
D.3. Protección frente a los insectos hematófagos	14
D.4. El debate termorregulación vs. defensa frente a los insectos	15
2. OBJETIVOS.....	15
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	16
a. Termografía aplicada a los estudios de termorregulación.....	16
b. Material animal y localización	17
c. Protocolo para los registros termográficos.....	17
d. Medios termográficos usados.....	21
e. Análisis estadísticos	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
a. Evaluación de las diferencias térmicas entre las distintas regiones corporales de la cebra.	22
b. Relación entre temperaturas de las regiones y ambiental	23
c. Análisis de la simetría térmica bilateral en las diferentes regiones corporales de la cebra.	24
d. Diferencias térmicas entre los colores de las rayas. Relación entre temperatura de las rayas y temperatura ambiental.....	27
e. Diferencias entre temperaturas debidas a los patrones de rayas. Variación con la temperatura ambiental.	28
f. Comprobación de la termólisis cutánea convectiva atribuible a las rayas. Aproximación al problema.	30
g. Discusión al problema de las rayas de las cebras	34
5. CONCLUSIONES	36
6. REFERENCIAS	37

1. INTRODUCCIÓN

Las rayas de cebra se encuentran entre los patrones de pelaje de mamíferos más llamativos y siempre han intrigado a los científicos. Darwin y Wallace entablaron un conocido debate sobre ello. Darwin (1871) especuló que las rayas de las cebras servían como un código entre hembras y machos a la hora de aparearse. Wallace (1879) creía que las rayas configuraban un patrón de colores que confundía a los depredadores. Sin embargo, no se ha establecido totalmente si cumplen una función adaptativa ni se han identificado los impulsores de la selección natural. (Ruxton, 2002)

Existen unas 18 hipótesis diferentes que le atribuyen diversas funciones adaptativas (Caro, 2016). Entre las más importantes tenemos:

- Protección contra los insectos tabánidos. (Egri et al, 2012 y Caro et al, 2015)
- Camuflaje frente a los depredadores gracias a un tipo de ilusión óptica que los confunde. (Stevens et al, 2011 y Scott-Samuel et al, 2011 y Larison et al, 2015)
- Adaptación al calor por su posibilidad de reducir la temperatura corporal. (Larison et al, 2015).
- Reconocimiento entre los individuos del grupo. (Kingdon, 1984)

De esta manera, el problema de las rayas de las cebras se considera una cuestión evolutiva.

A. Las distintas especies de cebra

La cebra es un animal del género *Equus*, dentro del cual podemos identificar tres especies de cebras: cebra común (*equus quagga*) (Figura 1), cebra de Grevy (*equus grevyi*) (Figura 2) y cebra de montaña (*equus zebra*) (Figura 3). Dentro de la cebra común hay seis subespecies: cebra de Burchell (Figura 4), cebra de Grant, cebra de Selous, cebra de Chapman (Figura 5), cebra de Crawshay (Figura 6) y Quagga (extinta), y en el caso de la cebra de montaña existen dos subespecies, cebra de montaña del Cabo y cebra de montaña de Hartmann. La cebra común es la más abundante y la más pequeña de las tres especies, y la cebra de Grevy es la más grande y está considerada en peligro de extinción.



Figura 1. Cebra común

<https://www.naturalezaavistadepajaro.com/>



Figura 2. Cebra de Grevy

https://es.wikipedia.org/wiki/Equus_grevyi



Figura 3. Cebra de montaña

<https://sp.depositphotos.com/stock-photos/cebra.html>



Figura 4. Cebra de Burchell

www.ecoregistros.org/ficha/Equus-quagga



Figura 5. Cebra de Chapman

<https://www.zoobarcelona.cat/en/animals/chapmans-zebra>



Figura 6. Cebra de Crawshay

<https://laanimalopedia.blogspot.com>

Las cebras están presentes en zonas del este y sudeste de África. Viven en territorios de Botsuana, Zimbabue, Tanzania, Zambia, Etiopía, Kenia, Somalia, Namibia y Angola. Habitan sabanas, praderas, pastizales, laderas rocosas y bosques con climas semiáridos. Suelen evitar desiertos, selvas y humedales (bioenciclopedia.com)

La cebra común vive desde zonas del sur de Sudán y Etiopía y de la sabana de África oriental hasta el sur y suroeste del continente africano. La cebra de Burchell (una subespecie de cebra común) es un animal de gran tamaño, extremidades fuertes y musculosas, cuello corto y ancho, y todo esto le permite ser un buen corredor. Originalmente se distribuye en las sabanas, pero también está presente en matorrales, bosques abiertos, sabanas abiertas y pastizales tropicales (Álvarez-Romero, 2005).

En todos los espacios en los que habita la cebra de Burchell es necesario que haya una buena cantidad de agua. Sin embargo, se ha adaptado a habitar aquellos ecosistemas donde hay mucha aridez y son capaces de migrar de un lugar a otro para encontrar el agua que necesitan para vivir recorriendo hasta 20 km en el día (quecomenn.com)

B. Formación de la capa rayada.

El color de la capa es debido a la suma de la pigmentación del pelo junto al color de la epidermis. La capa se debe a la presencia de unos pigmentos que se encuentran en forma de gránulos en los melanocitos, células productoras de pigmento. El color de la piel de la mayoría de animales depende de la actividad de los melanocitos y la cantidad de pigmentos que son capaces de generar y acumular. El aspecto final de la capa dependerá no solamente del tipo de pigmento, sino también de la cantidad, localización y forma de los gránulos.

Existen dos tipos principales de pigmentos en los équidos ambos derivados de la melanina: eumelanina (negro-marrón) y feomelanina (amarillo-rojizo). La coloración negra se debe a la expresión de la eumelanina, la forma más común de la melanina (el pigmento mayoritario de los seres vivos), mientras que los tonos rojizos que se aprecian especialmente en las cebras jóvenes, son debidos a la feomelanina. La regulación de la biosíntesis de dichos compuestos tiene lugar en el melanosoma de dichas células (Parés i Casanova, 1997). El color viene determinado por el número, distribución y grado de melanización y está controlado tanto por la genética del animal como por la hormona estimulante de la melanina (MSH) secretada por la hipófisis (Kandasamy y Panneerselvam, 2008). Más de 120 proteínas podrían intervenir en dicho proceso.

Los melanocitos se originan en la porción dorsal del tubo neural previo a su cierre, en embriones de vertebrados. Los melanoblastos precursores migran en sentido dorsolateral entre las capas mesodérmica y ectodérmica para alcanzar su destino final en los folículos pilosos y la piel (Figura 7) (Bard, 1977).

Una serie de moléculas de señalización producidas por células vecinas influyen en la migración de los melanoblastos y su diferenciación a melanocitos (Wolff K et al, 2008). Lo que ocurre en la cebra durante su desarrollo es que la eumelanina deja de expresarse en los melanocitos (las células de la epidermis) correspondientes a las zonas blancas.

La precocidad embrionaria puede afectar a la anchura de las rayas (Bard, 1977) Cuanto antes maduran los melanocitos en las distintas especies de cebras, se obtienen animales con menos y más gruesas bandas. Al activarse los melanocitos responsables del diseño antes de tiempo, acaban siendo sus bandas más gruesas.

Las rayas aparecen como resultado de cambios en las combinaciones de las proteínas reguladoras que se encuentran presentes en diferentes posiciones a lo largo de todo el eje cordal del embrión. Los genes que afecta a la expresión de las rayas actúan de manera compleja, pudiendo ser tanto activadores de la presentación de las rayas como de represores de las interrayas (Carroll, 1990).

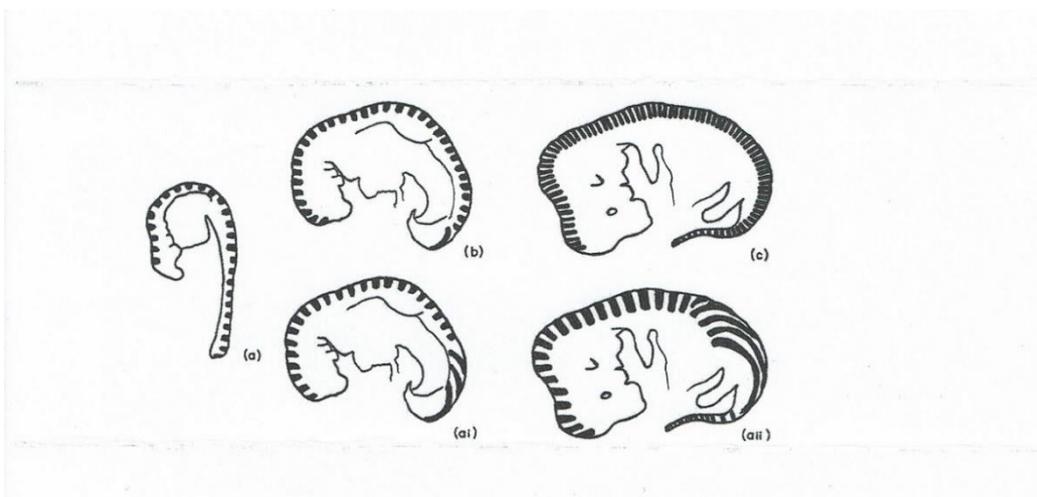


Figura 7. Patrón de rayado durante el proceso de crecimiento embrionario. Imagen tomada de J. Bard (1977) *A unity underlying the different zebra striping patterns* (a) embrión de 21 días con rayas de separación de 0,4 mm en la superficie dorsal (b) embrión de unas 3 semanas con rayas de separación de 0,4 mm (c) embrión de 5 semanas con rayas con mismo espacio de 0,4 mm (ai) efecto del crecimiento en 3/4 días de las rayas en embrión de 21 días (a ii) efecto del crecimiento de 2 semanas en embrión de 3 semanas. El número de franjas en cada zona del embrión (a) corresponde al patrón *E. burchelli* mientras el patrón de rayas del embrión de 5 semanas (c) es mucho más característico de *E. grevyi*.

C. Los diferentes diseños de los patrones rayados de la capa de las cebras

La característica más singular y reconocible de las cebras son las rayas negras y blancas de su cuerpo, pero existe variedad inter e intraespecífica en las cebras en cuanto los diseños o patrones de las rayas de sus capas (Figura 8) También entre los

dibujos que conforman las rayas en las diferentes regiones corporales de un mismo individuo.

Por causas no conocidas, el sistema de formación de patrones (diseños que forman las rayas) en la pierna es diferente del de la cabeza y el cuerpo. En las extremidades se forman rayas transversales que no siguen la orientación de migración desde la raya dorsal (Bard, 1977)

Las rayas se sitúan de forma vertical en la cabeza, en el cuello, en los cuartos delanteros, en la espalda y los costados, y son horizontales en la parte posterior del cuerpo y en las patas. Las cebras poseen una gran mancha blanca en el vientre que sirve para distinguirse. Algunas tienen “rayas sombra” de color marrón entre las rayas blancas y negras. Otra característica de las cebras es la existencia de una crin de pelo erizado blanco y negro.

Aunque las rayas blancas y negras que presentan las cebras sea una característica común, las tres especies de cebra no tienen una relación más cercana entre ellas que la que tienen con otros animales del género *Equus*. Además, la característica común de las rayas tampoco es tan definitiva; una de las subespecies de cebra común, la extinta *quagga* sólo tenía rayas en el cuello.

El grosor de rayas de la cebra varía regionalmente, desde rayas gruesas en blanco y negro sobre todo el cuerpo hasta una cobertura de rayas finas y más difusas en otras (Bard, 1977). En general, las cebras comunes (*equus quagga*) presentan unas rayas más anchas que las cebras de Grevy y las de montaña (Figura 8)

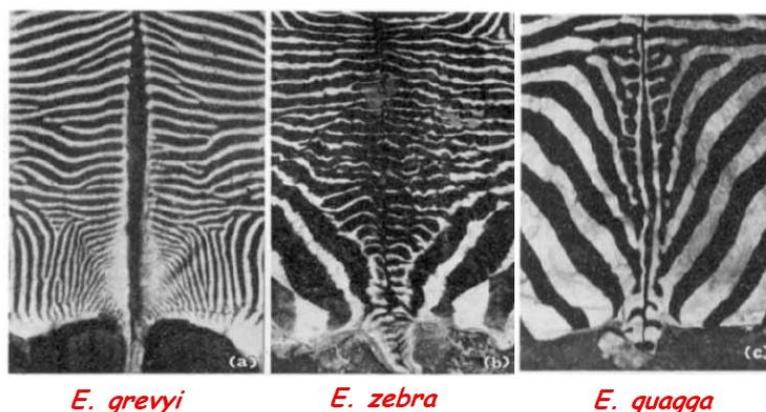


Figura 8. Diferentes patrones de rayado, definidos a lo largo de la línea central dorsal en tres especies de cebras (Imagen tomada de J. Bard, 1977)

Dentro de la especie de la cebra común, la cebra de Burchell y la cebra de Chapman tienen rayas en cabeza, cuello y flancos, y escasamente en las extremidades, donde la coloración es blanca. La cebra de Burchell posee un patrón de franjas negras anchas, intercaladas con otras de color café claro muy tenues intercaladas en los espacios blancos (Álvarez y Medellín, 2005).

Larison et al (2015) han relacionado los diferentes diseños rayados de las cebras con su localización geográfica y características ambientales térmicas. En las zonas del norte y más calurosas, las rayas son más gruesas y diferenciadas que en el sur (Figura 9). Realmente, “las capas eumelaninas carboxiladas presentan mayor capacidad de absorber radiación y tienen mayor poder antioxidante, mientras que las feomelaninas protegen poco frente a la radiación ultravioleta y generan más radicales libres. Así pues, la capa de un color u otro va a tolerar mejor o peor la radiación ultravioleta.” (Sañudo, 2017) En serpientes *Montivipera* se ha comprobado que la variación del dibujo rayado a nivel dorsal está relacionada con sus posibilidades de adaptación a las condiciones climáticas (Rajabizadeh et al 2015).

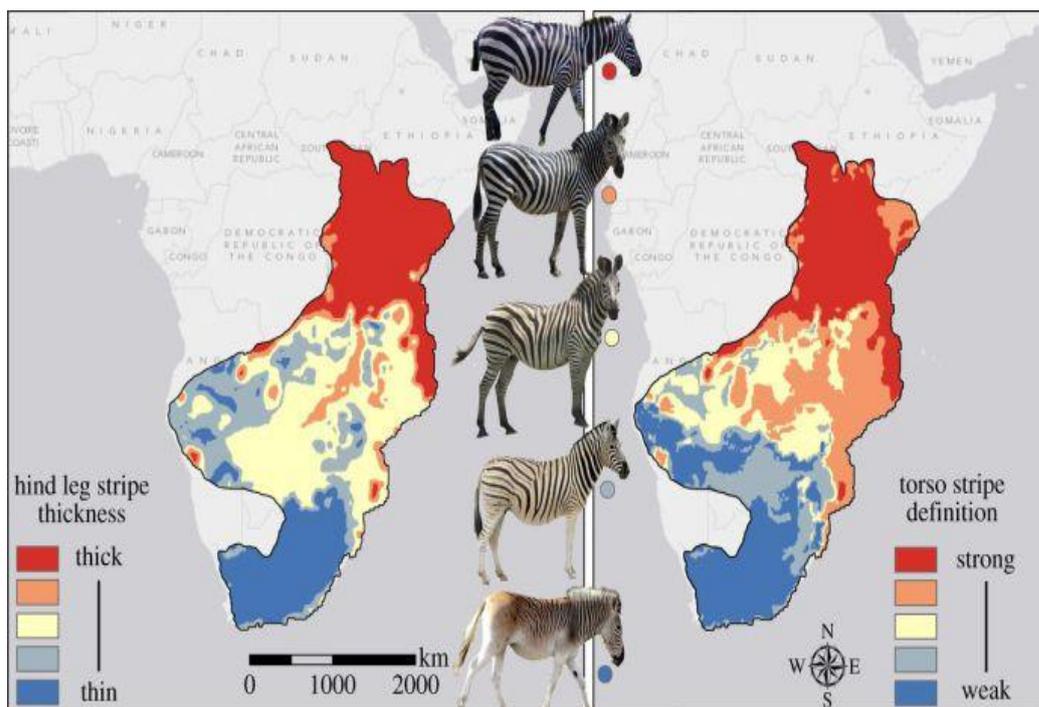


Figura 9. Distribución de los diferentes patrones de rayas en las extremidades posteriores y el torso de las diferentes variedades y especies de cebras a lo largo del gradiente térmico sur-norte, con temperaturas más bajas en el sur que en el norte. La coloración hace referencia a la intensidad del patrón, mostrando que el ancho de las bandas es mayor en el norte donde las temperaturas son mayores. Figura original de Larison et al. (2015).

Sin embargo, el gradiente fenotípico-geográfico anteriormente expuesto no se corresponde con las distancias filogenéticas de las especies (Figura 10), sino que podrían estar más relacionadas con la carga de tábanos del medio de tal manera que las capas rayadas se comportarían como disuasorias frente a los tábanos (Caro et al. 2014).

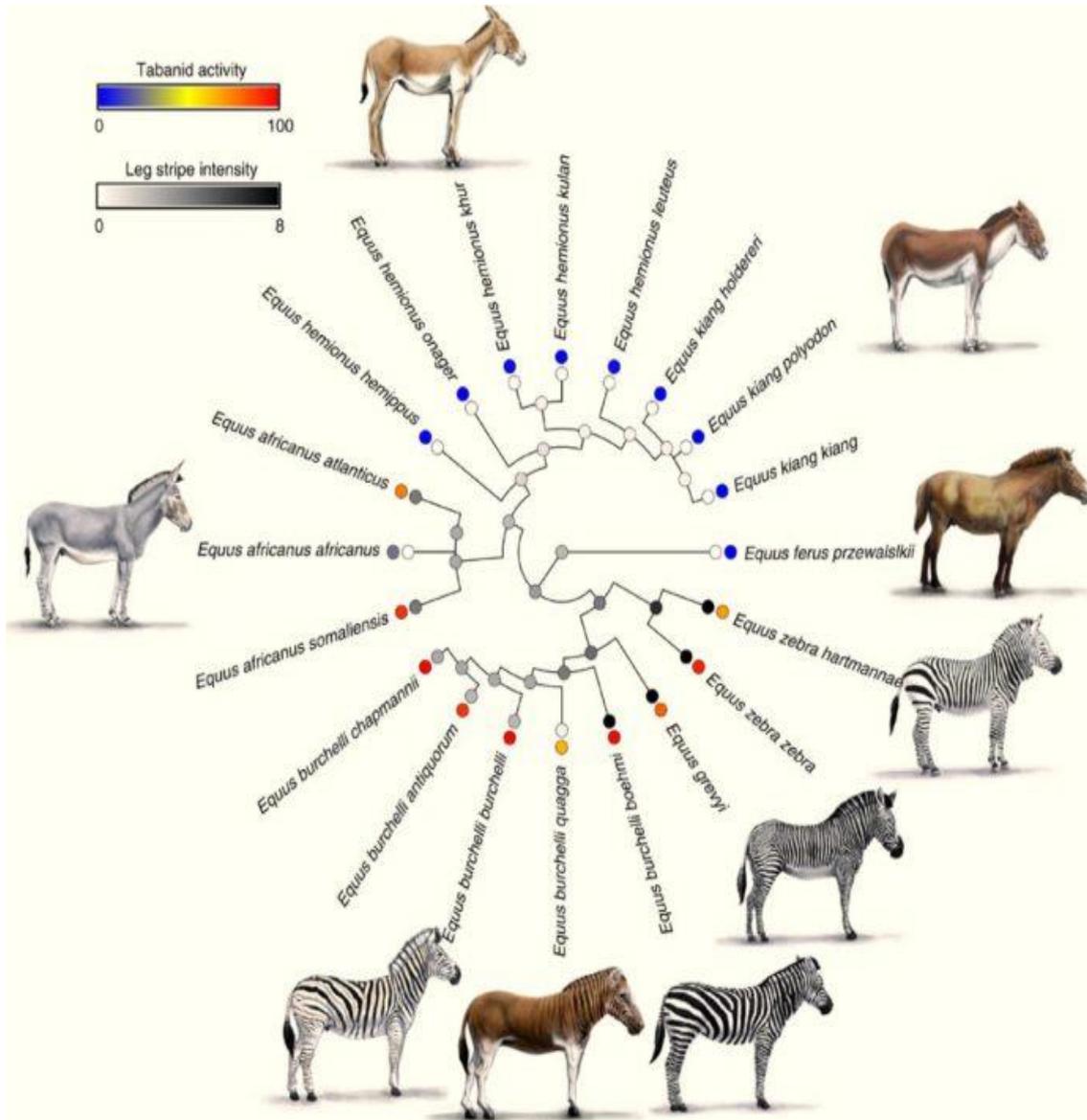


Figura 10. Relación entre las diferentes variedades y especies de cebras y del género *Equus*, así como la intensidad de su diseño a bandas, representado por los círculos que van de negro a blanco (siendo los negros los de más bandas, los grises intermedios y los blancos de patrones homogéneos), y la exposición a tábanos en sus respectivos ambientes (círculos de colores, rojos y amarillos representan ambientes con alta presencia de tábanos, colores fríos indican poca presencia de tábanos). Figura original de Caro et al. (2014)

Dado el polimorfismo que se puede presentar a nivel intraespecífico, Testé y Denis (2013) han recopilado los distintos caracteres identificadores del patrón de marcas de la cabeza de la población de cebras del Parque Zoológico Nacional de Cuba (pZn)

para crear una sistemática para la descripción y fotoidentificación de los individuos. Elaboran un código o clave para la identificación individual teniendo en cuenta la presencia de manchas aisladas, bandas incompletas, puentes entre rayas, rayas periorbitales y bifurcaciones. (Figura 11)

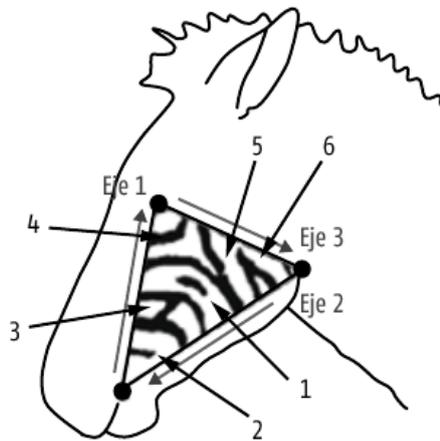


Figura 11. Representación de los ejes y del área del rostro considerada en la individualización de los ejemplares de cebras del pZn. Los números corresponden a los siguientes caracteres: 1) manchas aisladas, 2) bandas incompletas, 3) puentes entre rayas, 4) rayas periorbitales, 5) bifurcaciones ascendentes y 6) bifurcaciones descendentes. Imagen de Teté y Denis (2013)

D. Explicaciones al papel adaptativo de las capas de las cebras

D.1. Cohesión social e identificación entre miembros del grupo.

El argumento de la confusión y la ilusión óptica que pueden provocar las rayas de la cebrada puede permitir una mayor cohesión social del grupo. Las rayas confunden a las mismas cebras por lo que resulta que dentro de los grupos apenas se den casos de discriminación por sexo, relación parental o cualquier otro tipo. Esta idea se fundamenta en la observación de casos de cebras oscuras, por problemas de pigmentación, que se quedaban postergadas y no obtenían las ventajas del grupo. Esta explicación tiene un sesgo humano porque no tiene en cuenta que las cebras emparentadas pueden identificarse por olores específicos, igual que machos y hembras e incluso que las cebras sean capaces de identificar a cada individuo en función de sus dibujos particulares. Además, esta hipótesis debería ser capaz de explicar por qué otros équidos sin rayas (caballos) tienen grupos cohesionados como el de las cebras, o por qué algunos con cuerpos rayados no presentan grupos tan cohesionados. Así pues, una función social no puede explicar el rayado de los équidos (Caro et al, 2014)

D.2. Defensa frente a los depredadores

Las cebras son presas de depredadores y por eso tienen fuertes instintos de huida y defensa. Se mueven por medio de manadas y esto les sirve para disuadir a los depredadores y tienen gran capacidad visual (incluso por la noche) y un excelente oído. La primera reacción ante una amenaza es asustarse y escapar, aunque también pueden ser capaces de defenderse cuando no pueden huir o cuando el peligro amenaza a sus crías.

La ventaja de las rayas de las cebras como mecanismo de defensa frente a los distintos tipos de depredadores ha sido muy debatida; sin embargo, pocos estudios han demostrado los mecanismos a través de los cuales se produce (Cott, 1940); Vaughan, (1986) y Morris (1990) sugirieron que las rayas hacen que el animal parezca mayor. En otros casos se viene a explicar por el hecho de que les proporciona un camuflaje entre los pastos (Mottram, 1916; Cott, 1940 y Lythgoe, 1979), o entre los reflejos de luz (Godfrey al., 1987).

La explicación más aceptada es que las rayas generan confusión visual a los depredadores durante el movimiento de la estampida en grupo (Kruuk, 1972; Kingdon, 1984; Morris, 1990; Stevens, 2007). El desarrollo de simuladores computacionales está arrojando luz a este tema. Stevens et al. (2011) han puesto de manifiesto que, en el caso de especies que se mantienen en movimiento en espacios abiertos como es el caso de las cebras, la estrategia deslumbrante de las rayas es más eficaz que el camuflaje.

También con simuladores de imagen, se ha visto que la confusión al depredador o a insectos se produce principalmente mediante dos fenómenos de ilusión óptica visual: el efecto “vagón de tren” mediante el cual podemos percibir un movimiento en dirección opuesta a la real, como el que se produce al mirar en un estroboscopio o una rueda de carro al acelerar el giro de la imagen; y la ilusión visual del “poste del barbero” por la cual la dirección del movimiento es percibida incorrectamente debido al efecto de apertura o inclinación de las rayas (How and Zanker, 2015).

En cualquier caso, la ventaja frente a los depredadores se produce en situaciones que implican movimiento y no mediante ocultación o camuflaje. Esto ha podido ser comprobado por Melin et al (2016) quien realizó simulaciones con imágenes estáticas reproduciendo las capacidades visuales de los depredadores (leones y humanos) y las propias cebras ante diferentes distancias y niveles de follaje e iluminación. Las capas rayadas no hacen menos visibles al animal frente a las

uniformes, pero cuando los animales están en el movimiento durante una estampida la mayor confusión visual se producirá por aquellos patrones de rayas paralelas al sentido de avance de la huida y con estrategias de fuga de dirección variable y velocidad constante (Hogan et al, 2017).

D.3. Protección frente a los insectos hematófagos

En cuanto a la ventaja de las capas rayadas frente a los insectos, además de la que les confiere la confusión visual producida por el movimiento, se han propuesto otras dos explicaciones: por una parte, que las superficies corporales que presentan diseños con fuertes contrastes de color con el negro son disuasorias *per se* por asociarse con las de animales que emiten sustancias tóxicas como mecanismos de defensa (Egri et al, 2012); por otra, que, dado que las rayas blancas reflejan más la luz que las negras, las rayas confundirían a aquellos insectos chupadores que se conducen por polarotaxia (atracción hacia los cuerpos que reflejan la luz; Caro, 2014). Como se ha mostrado en la Figura 10, estos autores ponen de manifiesto la asociación entre las zonas geográficas de mayor carga de moscas mordedoras y el modelo de rayado de las cebras que habitan en esas zonas (número de rayas faciales y del cuello, rayado de flanco y grupa, intensidad de la raya de la pierna y sombra de rayas). A mayor distribución de mosca tsé-tsé mayor número de rayas. No obstante, Britten et al. (2016) han puesto de manifiesto que, aunque la polarización que se genera en la capa rayada es uniforme, la imagen rayada a más de 20 m puede ser visualmente detectada por el insecto sin tener que recurrir a la polarotaxia. Parece ser que la posible ventaja adaptativa de las cebras frente a tabánidos se encuentra en mecanismos no basados en la polarización.

En el último trabajo hasta la fecha acerca de esta explicación del rayado de las cebras, Caro et al. (2019) demostraron que un menor número de tabánidos se posaban en las cebras que en los caballos por unidad de tiempo, aunque las tasas de tabánidos que daban vueltas alrededor o tocaban brevemente el pelaje de la cebra y el caballo no fueron diferentes. Sucedió que, proporcionalmente, un mayor número de tabánidos tocaban en lugar de aterrizar en el pelaje de la cebra en comparación con los caballos. Esto quiere decir que las rayas impidieron que las moscas realizaran un aterrizaje controlado, pero esto no influía en la conducta tabánida a distancia. Además, para contrarrestar a las moscas, las cebras agitaban la cola y se escapaban del vuelo molesto mientras que los caballos mostraron tasas más altas de contracción de la piel. Como consecuencia de las rayas, muy pocos tabánidos aterrizaron con éxito en las cebras.

D.4. El debate termorregulación vs. defensa frente a los insectos

Larison et al, (2015 a) sugieren que “los agentes selectivos que dirigen la formación de bandas de cebras son probablemente múltiples y complejos”, pero anteponen la asociación entre las características climáticas térmicas y pluviométricas del medio con la intensidad del rayado (Figura 9) frente a la relación con la carga de insectos propuesta por Caro et al (2014). Esto quedaría fundamentado porque las rayas negras y blancas se comportan de manera distinta frente al calor. Las rayas negras absorben más el calor que las blancas y la diferencia térmica entre rayas contiguas generaría, por convección, una corriente de aire que refresca la superficie corporal del animal.

Caro y Stankowich (2015) replicaron a Larison proporcionando pruebas de que el parasitismo de las moscas tabánidas se correlacionaba perfectamente con la presencia de más rayas en todas las partes del cuerpo y especialmente las patas, lugar preferido por las moscas mordedoras para “aterrizar” en sus hospedadores. No encontraron evidencia convincente de que la distribución geográfica de las rayas en cualquier parte del cuerpo se asocie con la distribución del león por el continente africano, ni que estuvieran asociadas con camuflaje en bosques o árboles, ni encontraron pruebas contundentes de la relación con las distribuciones de la mosca tsé-tsé. Descartaron la idea de que las rayas pueden generar remolinos de enfriamiento en cualquier parte del cuerpo y apuntaron a los tabánidos u otro tipo de moscas mordedoras como impulsores evolutivos de las rayas de los équidos.

No tardó en producirse una nueva respuesta de Larison et al., (2015 b) insistiendo en la necesidad de tener en cuenta la temperatura y la humedad como elemento de conexión entre ambos postulados ya que están “altamente correlacionadas con los patrones de trazado de líneas inter e intraspecíficas”. No obstante, reconocen que la atribución de un papel termorregulador para las rayas requiere evidencias empíricas adicionales y sugieren que la parte del cuerpo de mayor importancia a este respecto sería el dorso. En un reciente trabajo publicado en *Nature*, Åkesson et al (2018) han aplicado termografía sobre barriles pintados de rayas para probar esta hipótesis del efecto refrescante producido por posibles corrientes de convección entre rayas, pero los resultados obtenidos han conducido a rechazarla.

2. OBJETIVOS

Tal como se ha expuesto, el papel de las rayas de las cebras resulta un tema controvertido que ha ocupado a los investigadores a lo largo de los años y sobre el que

se sigue debatiendo y realizando estudios con la ayuda de nuevas herramientas computacionales y electrónicas. Por ello, en este estudio hemos creído de interés aplicar la termografía óptica para contrastar el posible efecto de la capa rayada sobre la termorregulación de las cebras.

Además de exponer los últimos hallazgos publicados sobre el problema de las rayas de las cebras que hemos venido desarrollando, este trabajo pretende:

- 1) Evaluar las diferencias térmicas y entre las distintas regiones corporales de la cebra y su respuesta frente a cambios de temperatura ambiental.
- 2) Analizar la simetría térmica bilateral en las diferentes regiones corporales de la cebra.
- 3) Comprobar las diferencias térmicas entre las rayas negras y blancas de las cebras y si éstas diferencias son suficientes para producir corrientes convectivas de acción refrescante.
- 4) Comprobar si las características del patrón de las rayas afectan a la temperatura regional.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

a. Termografía aplicada a los estudios de termorregulación

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar, mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético. Utilizando cámaras termográficas podremos convertir la energía radiada por el animal en información sobre su temperatura. La información térmica responde a su estado puntual en cuanto a su temperatura.

Sin embargo, la radiación medida por la cámara no solo depende de la temperatura del objeto, sino que es también una función de la emisividad. La radiación infrarroja procedente del objeto y la radiación reflejada también estarán influenciadas por la absorción de la atmósfera. Los siguientes parámetros deben ser proporcionados a la cámara: la emisividad del objeto, la temperatura aparente reflejada, la distancia entre el objeto y la cámara, la humedad relativa y la temperatura de la atmósfera.

La termografía resulta la técnica ideal para la detección de procesos que impliquen cambios de temperatura. Por ello, aparte de apoyar la detección de enfermedades infecciosas, esta herramienta puede aplicarse para estudios de termorregulación, control y análisis del comportamiento y la reproducción o la estimación de tamaños poblacionales.

La termografía infrarroja es una técnica de gran valor a la hora de identificar procesos fisiológicos o patológicos que cursen con cambio de temperatura superficial de los animales, (Fowler et al., 2007; Melero et al., 2009) como por ejemplo procesos febriles. (Rodríguez et al., 2008).

Sus características la convierten en una técnica de elección para aplicar en fauna silvestre, sobre todo debido a que es no invasiva y a que ofrece grandes opciones analíticas posteriores. Al poder establecer registros a distancia de la temperatura corporal del animal, así como la del medio en que se encuentra, el uso de la termografía se está imponiendo cada vez más en el ámbito de la veterinaria de los zoológicos. Por todo ello, la termografía ha demostrado ser una herramienta útil para valorar el bienestar de los animales alojados en zoológicos. En el caso concreto de las cebras, que son animales a los que es problemático acercarse (al fin y al cabo, son especies salvajes), es muy importante emplear métodos de diagnóstico que no impliquen contacto directo y de ahí la importancia del empleo de la termografía. (Cilulko et al., 2013).

b. Material animal y localización

El animal sobre el que se ha realizado el estudio es una cebra hembra de 10 años de la especie cebra común o de Burchell (*equus burchellii*) del Parque Zoológico Municipal de Córdoba. Se encuentra en una instalación de aproximadamente 2500 m² (con instalaciones interiores de 250 m²) que tematiza la sabana africana compartida con una cebra macho de 7 años, avestruz y un ñu de cola blanca. No hay nada reseñable en ambas cebras comunes, excepto el hecho de que la hembra se encuentra preñada. Se ha realizado la desparasitación y se han aplicado las vacunas habituales (tétanos, gripe y herpesvirus).

c. Protocolo para los registros termográficos

El registro termográfico se ha efectuado en diferentes sesiones diarias en el Parque Zoológico Municipal de Córdoba, una vez que el animal fue dispuesto convenientemente por el cuidador dado el difícil manejo de esta especie. Las tomas de temperatura fueron en la parte de las instalaciones al aire libre en las que se encuentra la cebra y se obtuvieron a una distancia de alrededor de un metro.

Para evitar el posible efecto de las diferencias en el ángulo de iluminación solar, los registros se realizaron en el mismo mes (junio de 2018) y a la misma hora (13.00 h) empleando sólo días soleados totalmente despejados y procurando que los días de

observación no se extendieran mucho más allá de una semana (días 13, 14, 15, 18 y 21 del mes).

Durante los registros las cebras estaban directamente expuestas a la luz solar, nunca estaban en la sombra. A pesar de la dificultad de manipulación, los registros sólo se produjeron cuando el animal mantenía su eje longitudinal corporal en perpendicular a la dirección de la toma gráfica de la cámara y en orientación geográfica Este-Oeste.

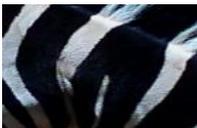
De esta manera, al realizarse las tomas muy próximas al mediodía, el ángulo de incidencia de la luz solar era casi perpendicular al dorso del animal. No obstante, para los estudios de la simetría bilateral, las tomas se realizaron cuando la cebra cambiaba su posición de orientación hacia la dirección contraria.

Las diferentes regiones que se establecieron fueron: cuello, carrillos, costillar y muslos (tanto derechos como izquierdos). Para evitar la variación entre la irradiación solar de una región a otra en el análisis de las diferencias térmicas entre las regiones, se tomaron registros sólo en aquellas partes o secciones de la región que se encontraban en un mismo plano vertical y proximidad respecto a la cámara (Figuras 12 a 15) Cada sesión duró unos 15 minutos en los que no hubo grandes variaciones en la irradiación solar. El registro termográfico de cada región se repitió 10 veces/día

A partir de las imágenes del mapa termográfico editadas por el software Tools de FLIR se obtuvieron las medidas térmicas de cada una de las rayas blancas y negras de áreas establecidas en cada región. Se tomaba la temperatura sobre un punto de cada raya (contigua)

Para analizar si los diferentes patrones o dibujos de las rayas suponen diferencias térmicas, se identificaron tres patrones de rayas diferentes que describimos a continuación según la metodología de Testé y Denis (2013).

El patrón 1 (P1)  Se observa una banda incompleta

El patrón 2 (P2)  parece una bifurcación descendente



El patrón 3 (P3) Hay tres bandas incompletas

No todos los patrones estaban presentes en cada una de las regiones. La Tabla 1 relaciona las regiones termografiadas y los patrones que presentan. Para cada patrón se determinó un área circular de 2 cm de diámetro. Los valores medios de las temperaturas máximas, mínimas y medias de esas superficies fueron calculados por el software FLIR anteriormente mencionado.

Los datos de humedad y temperatura de las condiciones ambientales se obtuvieron con la propia cámara termográfica durante cada uno de los registros.

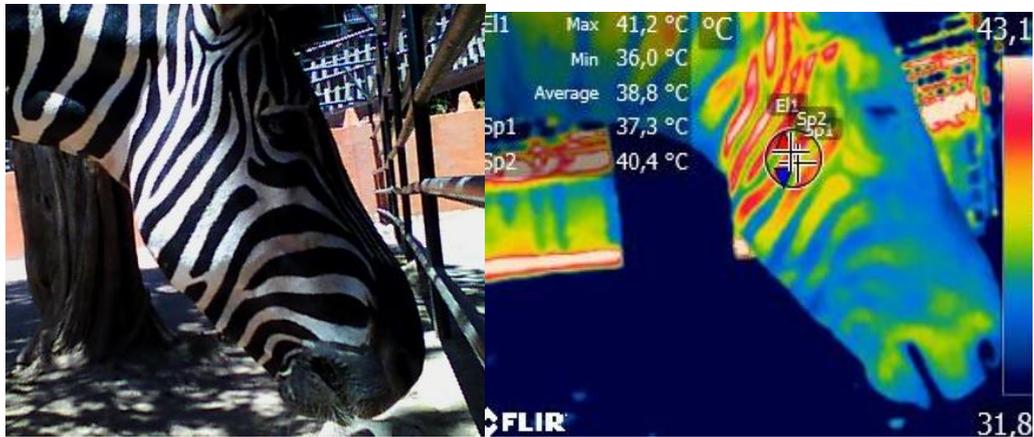


Figura 12. Fotografía e imagen termográfica del carrillo.

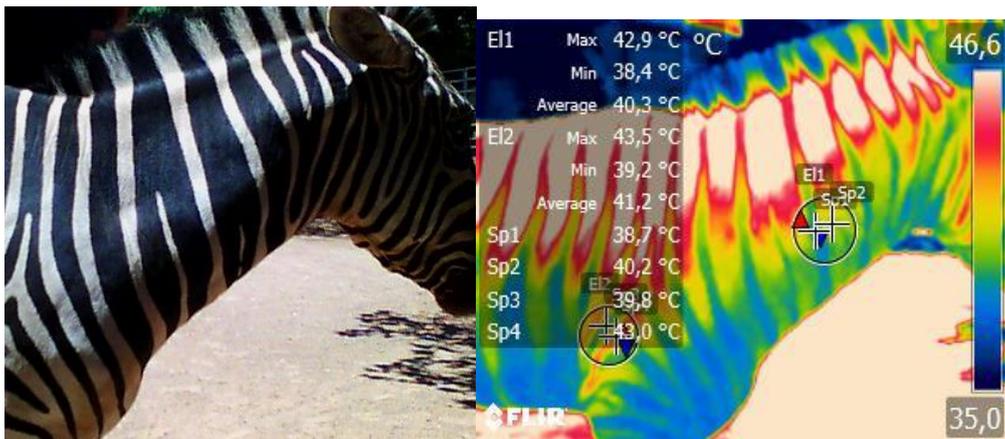


Figura 13. Fotografía e imagen termográfica del cuello.



Figura 14. Fotografía e imagen termográfica del costillar.



Figura 15. Fotografía e imagen termográfica del muslo.

Tabla 1. Relación de Regiones y Patrones

REGIONES ANATÓMICAS	PATRONES
Carrillo (CAR) Figura 12	P1
Cuello (CUE) Figura 13	P1
Cuello (CUE) Figura 13	P2
Costillar (COS) Figura 14	P1
Muslo (MUS) Figura 15	P3

d. Medios termográficos usados

Para los registros termográficos se utilizó una cámara térmica de Modelo E6, de FLIR® Systems Inc., Massachusetts, USA (Forward Looking Infra-Red-), cuyas especificaciones de resolución, entre otras características, se exponen en la Figura 16.

FLIR E6	
Resolución infrarroja	160 x 120 píxeles
Resolución MSX®	320 x 240 píxeles
Sensibilidad térmica	< 0.06 °C
Rango de temperaturas	- 20 °C a 250 °C
Exactitud	± 2 °C o ± 2 % de lectura
Emisividad	0.1 a 1



Figura 16. Imagen y especificaciones técnicas FLIR

La cámara fue calibrada para la temperatura ambiental y para la emisividad de tejidos biológicos $\epsilon = 0.98$ FLIR.

Las imágenes térmicas infrarrojas obtenidas fueron analizadas y tratadas con el programa informático FLIR Tools, (FLIR® Systems Inc.) que nos permite visualizar el mapa termográfico y delimitar áreas dentro de las regiones calculando las temperaturas media, máxima y mínima de la zona seleccionada. También nos ofrece la temperatura en cada uno de los puntos intrarraya seleccionados.

e. Análisis estadísticos

Con la finalidad de estudiar la simetría térmica de la cebra y las diferencias entre regiones y patrones, se calcularon los estadísticos descriptivos básicos de cada variable: temperatura ambiental, humedad relativa ambiental, temperaturas medias en cada localización (región) y tipo de patrón o color de las rayas. Una vez contrastado el ajuste a la normalidad de los datos, se comparó la diferencia mediante análisis de varianza ANOVA y prueba *post Hoc* de Bonferroni ($p < 0,05$). Para la comprobación de la simetría bilateral y de las diferencias por pares entre los dos colores de rayas, se empleó la prueba t de Tukey. Los valores medios y su variación fueron representados en forma de Diagrama de Caja y Patillas.

Para analizar la correspondencia entre las temperaturas corporales obtenidas y entre éstas y la temperatura ambiental, se estimaron los coeficientes de variación y se realizó análisis de Regresión Lineal.

Todos los datos que se obtuvieron fueron registrados en hojas de cálculo Excel para su exportación y análisis por medio del programa STATISTICA 7.0 para Windows.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Evaluación de las diferencias térmicas entre las distintas regiones corporales de la cebra.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos básicos para el conjunto de los datos.

	N	Media	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Error estándar
T ^a Amb °C	250	31,80	28,00	35,00	2,32	7,30	0,15
T ^a Media °C	250	38,13	34,20	43,50	1,68	4,40	0,11
Humedad Amb %	250	42,20	34,00	51,00	6,11	14,48	0,39

Como se expone en la Tabla 2 y la Figura 17, las temperaturas medias más altas corresponden al carrillo (38,7°C) y cuello (38,2°C); las más bajas se midieron en el muslo (37,8°C) y costillar (37,6°C). Los estadísticos descriptivos muestran que la región del costillar presenta una mayor homogeneidad térmica, siendo, sin embargo, la región de menor superficie, la de mayores rangos de variación térmica en todo el período del análisis.

La región anatómica que presentó mayor dispersión en los datos fue la de los carrillos con un coeficiente de variación de 4,78 y la menor se observó en el costillar (3,99), mientras que el muslo y cuello mostraron coeficientes muy parecidos (4,27 y 4,25, respectivamente)

La temperatura media tomada termográficamente de la cebra ha sido de 38,13°C, muy parecida a la temperatura corporal normal de los équidos (37,5-38,5°C), pero menor que la de los bovinos adultos (38,5-39,5°C). No obstante, Larison et al. (2015), en observaciones de campo, demostraron que las cebras mantienen una temperatura corporal superficial más baja (29,2°C vs. 32,5°C) que los herbívoros de tamaño similar que están cerca en las mismas condiciones. Mortola (2013) indicó en su estudio que la temperatura de la cebra de Burchell era de unos 29,9°C con 23,5°C de temperatura ambiental, también menor que la del caballo (32,1°C) y de la vaca (33,8°C) Por su parte, McCafferty (2007) obtuvo mediante termografía una temperatura media de la cebra de Grant de 31,1°C, si bien fue tomada a la sombra.

Sin embargo, Caro y Stankowich (2015) concluyeron que las cebras (36°C) son siempre más cálidas de forma significativa que herbívoros fotografiados bajo las mismas condiciones, impalas (34,2°C), búfalo (34,1°C) y jirafa (33,3°C), midiendo las temperaturas en los costados de los animales.

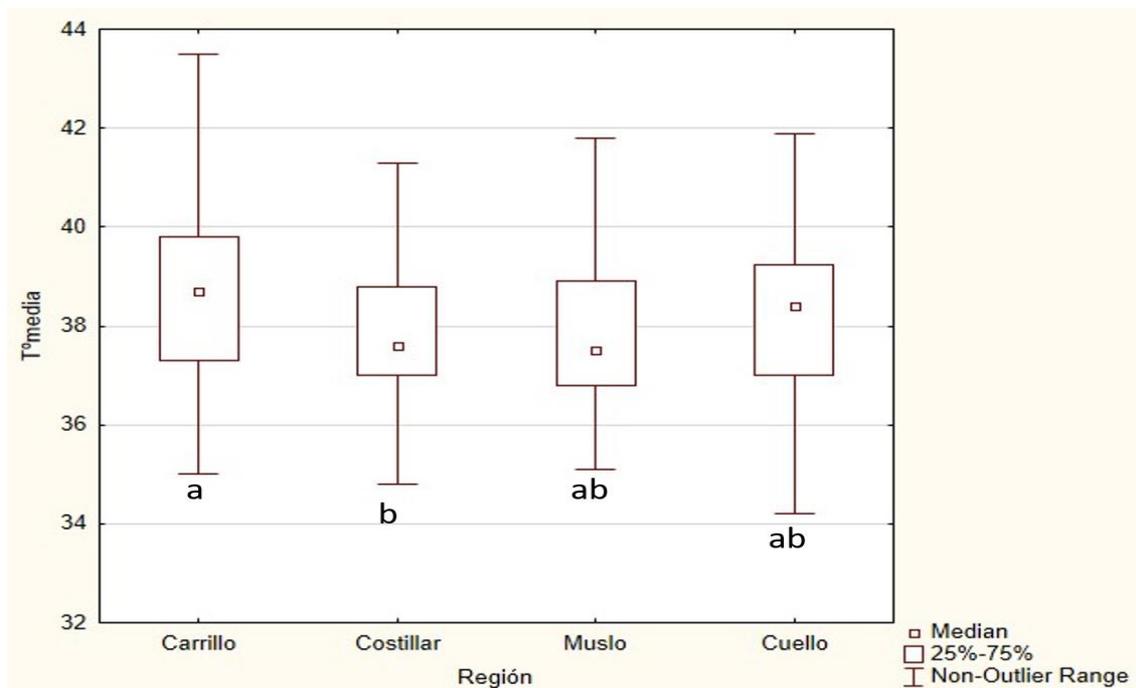


Figura 17. Gráfico de Caja y Patillas para el estudio regional de la temperatura. P-value < 0.001

Las diferencias entre las temperaturas medias de cada región resultaron altamente significativas ($p < 0,0001$) debidas principalmente a las diferencias entre la región del carrillo y costillar, no existiendo apenas diferencias entre las regiones del costillar y muslo.

b. Relación entre temperaturas de las regiones y ambiental

Para el estudio de la variación de la temperatura media entre regiones en función de la temperatura ambiental, analizamos los coeficientes de correspondencia R^2 de la regresión para cada región (Figura 18).

En las regiones corporales costillar, carrillo y muslo encontramos cierta relación entre la evolución de sus temperaturas medias y la temperatura ambiental, que se ve explicada por las ecuaciones expuestas en la Figura 18.

Encontramos, sin embargo, que el cuello se ve más afectado por las variaciones climáticas (coeficiente R^2 de 0,012, muy cercano a 0), por lo que deducimos que existe

una baja capacidad explicativa de la recta de regresión y atribuimos un bajo grado de asociación lineal entre la temperatura ambiental y la media de la temperatura del cuello. En el resto de las regiones también se observa baja asociación lineal, aunque no tan marcada como en el caso anterior (Tabla 2).

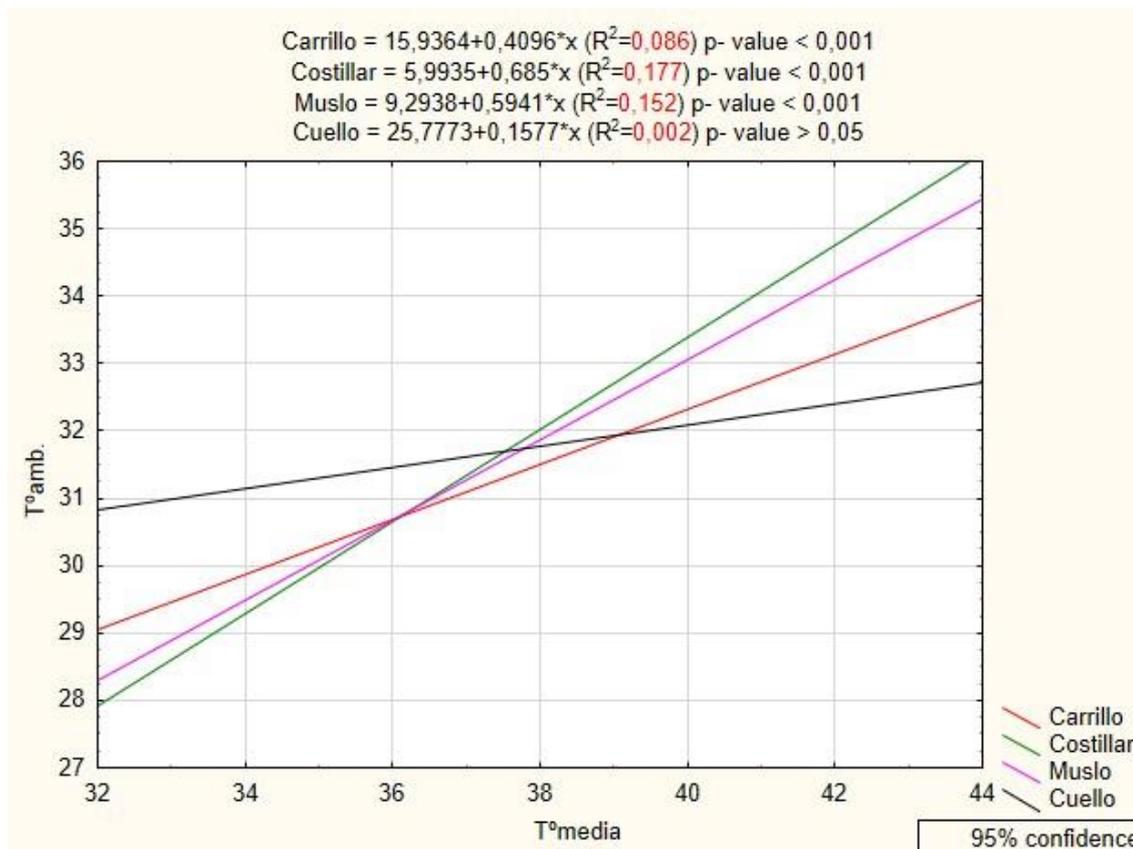


Figura 18. Gráfico de Regresión de las regiones en relación con la temperatura ambiental.

c. Análisis de la simetría térmica bilateral en las diferentes regiones corporales de la cebra.

Las diferencias térmicas entre ambos lados resultaron estadísticamente significativas ($P < 0,001$), tanto en el conjunto de las regiones como en cada una de ellas. (Figura 19).

La dispersión de las temperaturas de ambos lados resultó análoga, pues en el lado derecho el coeficiente de variación fue de 3,42 por 3,21 del lado izquierdo.

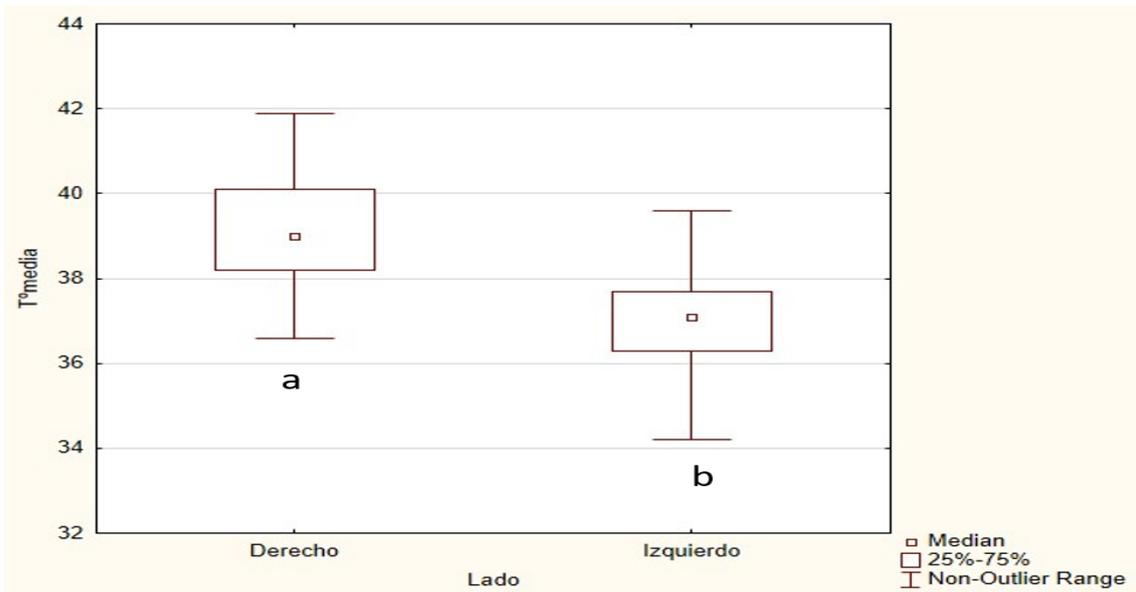


Figura 19. Diagrama de Caja y Patillas de la temperatura media de lados izquierdo y derecho. P-value < 0.001

En el caso de los lados se aprecia claramente unas diferencias de temperatura entre el izquierdo y el derecho de alrededor de 2°C a favor del lado derecho.

Las diferencias más altas entre los lados izquierdo y derecho se dieron en el cuello (P2) y carrillos con 2,912 y 2,284°C, respectivamente. Las más bajas se encontraron en el costillar (1,736°C) y en el cuello (P1) con 1,964°C. En el muslo hubo una diferencia de 2,096°C. (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de las temperaturas medias de los lados izquierdo y derecho de las distintas regiones anatómicas.

LADOS	Derecho	Izquierdo	Diferencia
REGIÓN			
Carrillo P1	39,86800	37,58400	2,28400
Cuello P1	39,30000	37,33600	1,96400
Cuello P2	39,52000	36,60800	2,91200
Costillar P1	38,54400	36,80800	1,73600
Muslo P3	38,92800	36,83200	2,09600
MEDIA	39,23200	37,03360	2,19840

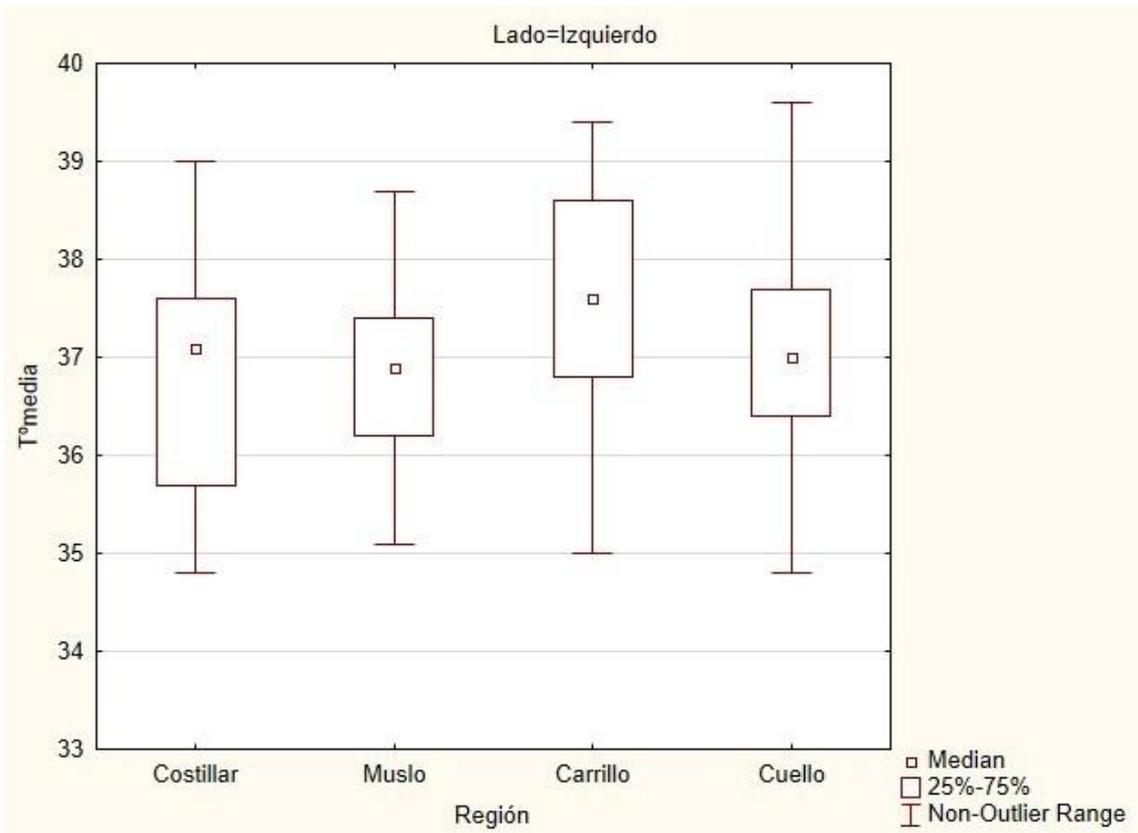


Figura 20. Diagrama de Caja y Patillas de la temperatura media del lado izquierdo.

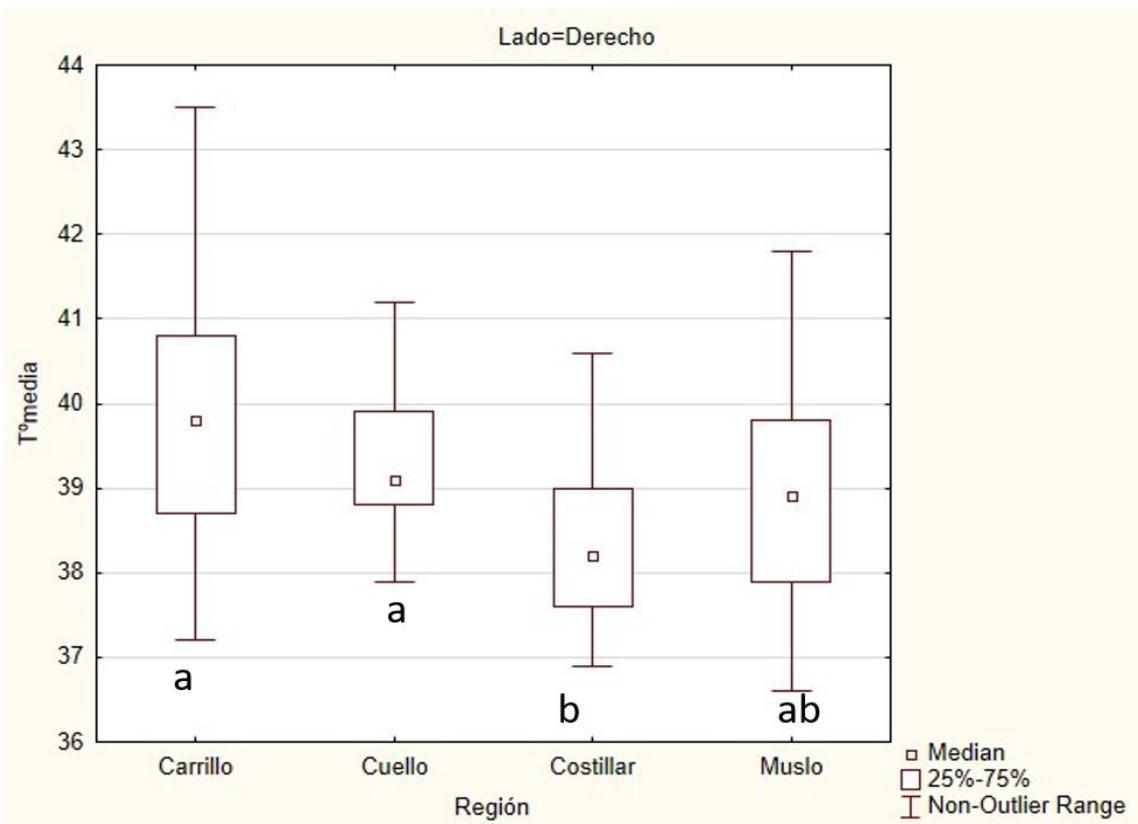


Figura 21. Diagrama de Caja y Patillas de la temperatura media del lado derecho.

Se observan fluctuaciones en las diferencias entre los lados derecho e izquierdo en las distintas regiones anatómicas. Así, en el caso del carrillo, la diferencia va aumentando cuando la temperatura ambiental pasa de 28°C a 32°C, pero disminuye a los 35°C y 33°C. En el cuello (P1) sí se ve un decremento a medida que aumenta la temperatura ambiental pasando de 4,7°C de diferencia entre lados a 1,46°C; igual ocurre en el cuello (P2) pues la disminución es notable, pasando de 4,84°C de diferencia a valores de unos 2°C. En el costillar, las diferencias son más uniformes, se mantienen en torno a los 2°C, salvo en el caso de 32°C de temperatura ambiental que pasa a ser de solo 0,20°C. Finalmente, en el caso del muslo, se muestran bastantes oscilaciones con subidas y bajadas de temperatura media de dicha región al ir aumentando la temperatura ambiental.

d. Diferencias térmicas entre los colores de las rayas. Relación entre temperatura de las rayas y temperatura ambiental.

Observamos que la variación de la temperatura es mayor en las rayas negras que en las blancas, lo que indica que la temperatura es más homogénea en las rayas de color blanco.

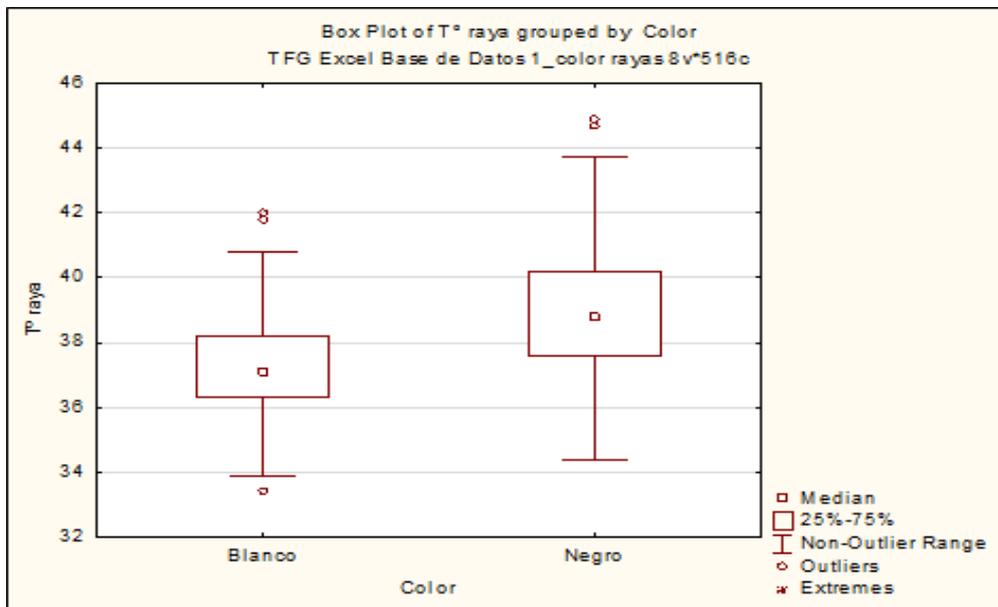


Figura 22. Diagrama de Caja y Patillas de las temperaturas medias de las rayas blancas y negras.

Como cabría esperar, las temperaturas de las rayas negras son claramente más altas que las de las rayas blancas ($p < 0,0001$) La diferencia de temperaturas medias entre rayas negras y blancas es de 1,78°C.

El análisis de regresión (Figura 23) muestra que las temperaturas medias de ambas rayas van aumentando conforme lo hace la temperatura ambiental con progresión similar por parte de las rayas negras y de las blancas.

No obstante, si nos ceñimos al coeficiente de determinación R^2 , vemos que el 2,95% de la variabilidad queda explicada por el color negro y el 11,38% por el color blanco: $R^2 = 0,029570$ ($p < 0,003762$) para el color negro y $R^2 = 0,113873$ ($p < 0,0001$), para el color blanco.

Los dos coeficientes de determinación tienen valores bajos, por lo que el modelo de regresión tiene poco poder explicativo (aunque mejor en el caso del color blanco) de la variación total de la temperatura ambiental.

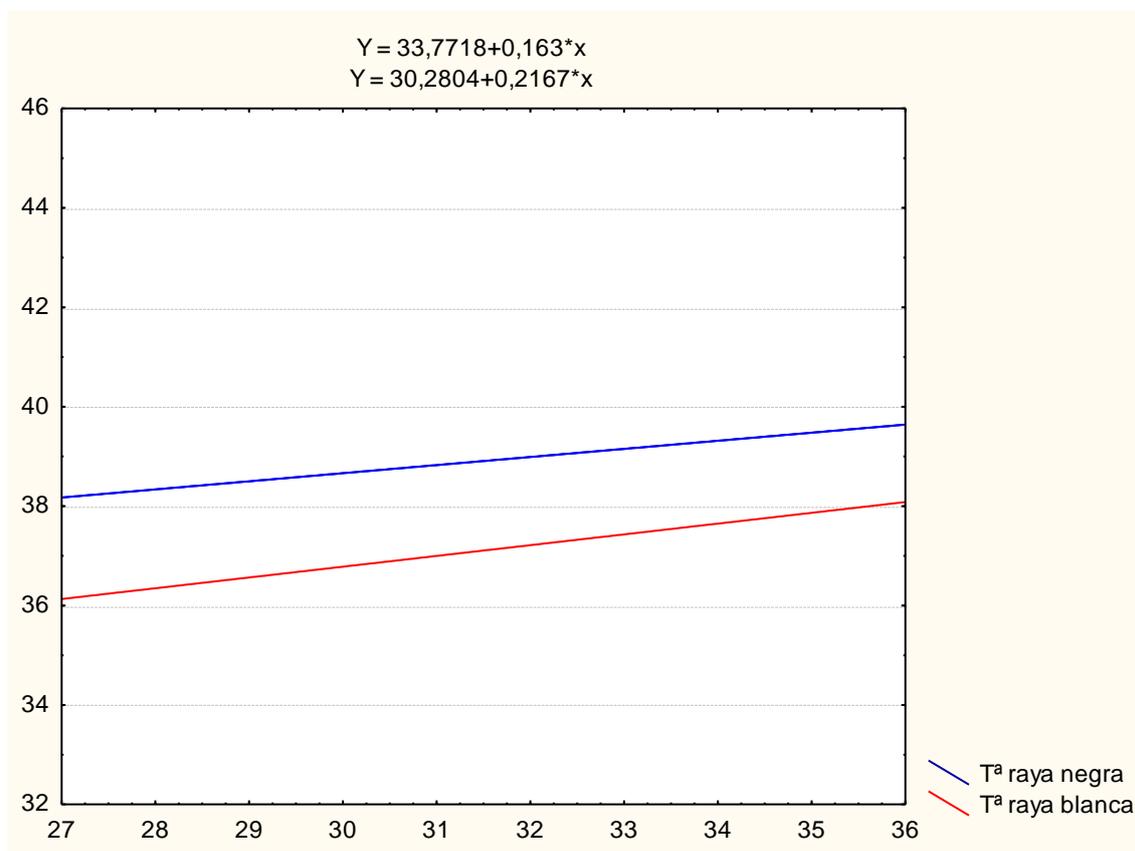


Figura 23. Gráfico de Regresión de las rayas negras y blancas en relación con la temperatura ambiental.

e. Diferencias entre temperaturas debidas a los patrones de rayas. Variación con la temperatura ambiental.

Al estudiar las diferencias térmicas entre los tres patrones de rayas (P1, P2 y P3) (Figura 24), observamos que las variaciones de temperatura de cada uno de los patrones son escasas, siendo el Patrón 3 el que menor oscilación presenta.

Según los datos de los estadísticos simples de los diferentes patrones de rayas, los tres tienen un grado de dispersión de los datos muy parecido, con coeficientes de variación entre 4 y 5: el P2 4,59, el P1 4,37 y el P3 4,27.

El patrón que mayor temperatura ha registrado ha sido el P1 y el que menos el P3. Las diferencias térmicas encontradas entre patrones son estadísticamente diferentes ($P < 0,05$) como resultado de las existentes entre el P1 y el P3. Al no existir los tres modelos de patrones en cada una de las regiones, el posible efecto debido al diseño de las rayas sobre la temperatura superficial del animal, no puede ser detectado con relación al efecto de las diferencias inherentes a las temperaturas de las regiones. La única región que presenta dos patrones distintos (P1 y P2) es el cuello. Las diferencias encontradas entre ambos patrones podrían explicar la gran variación intrínseca a esta zona corporal que habíamos detectado previamente.

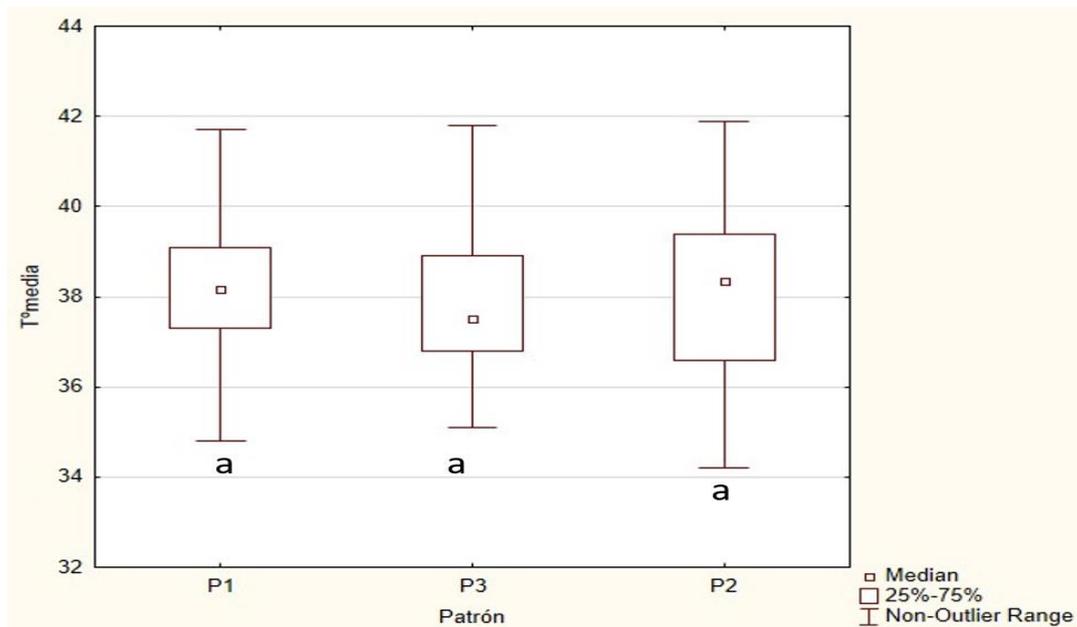


Figura 24. Diagrama de Caja y Patillas de la temperatura media de los Patrones.

Al analizar la variación de la temperatura en cada una de las áreas caracterizadas por los patrones (P1, P2 y P3) con relación a la temperatura ambiental (Figura 25), encontramos que el patrón 2 se comporta de manera más independiente a los cambios ambientales.

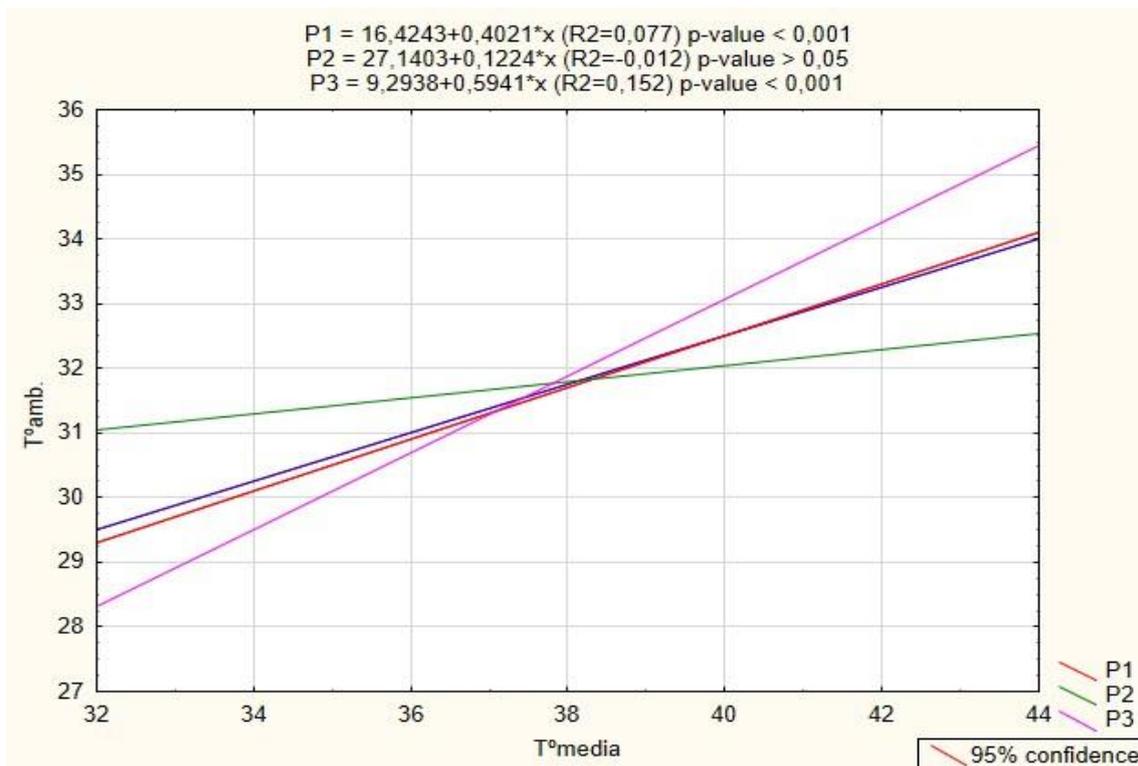


Figura 25. Gráfico de Regresión de los Patrones en relación con la temperatura ambiental.

No obstante, si nos ceñimos al coeficiente de determinación R^2 , vemos que la mayor parte de la variación (16%) queda determinada por el P3. El menor coeficiente de determinación lo tiene el P2, cuyo modelo de regresión tiene un casi nulo poder explicativo sobre la variación en función de la temperatura ambiental.

En el Patrón 2 tenemos muy poco grado de asociación lineal entre x e y. Un poco más lo encontramos para los Patrones 1 (0,080) y 3 (0,160).

f. Comprobación de la termólisis cutánea convectiva atribuible a las rayas. Aproximación al problema.

El hipotético enfriamiento por termólisis cutánea evaporativa (TCE) favorecida por el efecto de las microcorrientes de aire generadas por las diferencias térmicas entre rayas ha sido fundamentado por Morris (1990) Según esta hipótesis en un clima sin ventilación podrían producirse corrientes de aire de dirección horizontal entre dos rayas negras contiguas (de superior temperatura que las blancas). También se producirían corrientes de aire descendentes y ascendentes para cada raya blanca o negra respectivamente. Los flujos de aire descendentes (remolinos) podrían formarse solo en la parte más horizontal del cuerpo de la cebra. En la inclinadas y en las superficies verticales del cuerpo, el flujo de aire puede ser bastante caótico y se espera que sea turbulento. Ver esquema en Figura 26.

Kameya y Yamaoka (1968) en un experimento con caballos indicaron que la temperatura de la piel no estaba influenciada por el tiempo, presión atmosférica o humedad, sino principalmente por la temperatura ambiente. En una investigación sobre la TCE y su relación con el microclima y la temperatura superficial de la capa en terneros llevada a cabo por Freire de Souza Jr., et al. (2018), concluyeron que, en condiciones de alta temperatura y a la sombra, la TCE está positivamente relacionada con la temperatura ambiente y se distribuye homogéneamente en toda la superficie del cuerpo de los terneros. Por lo tanto, la temperatura ambiente es el desencadenante para la TCE, produciéndose además un aumento significativo de ésta cuando la temperatura del aire era mayor de 29°C. La correlación entre la TCE y factores como la temperatura superficial de la capa, la humedad relativa, la temperatura media radiante o la velocidad del viento no fueron significativas.

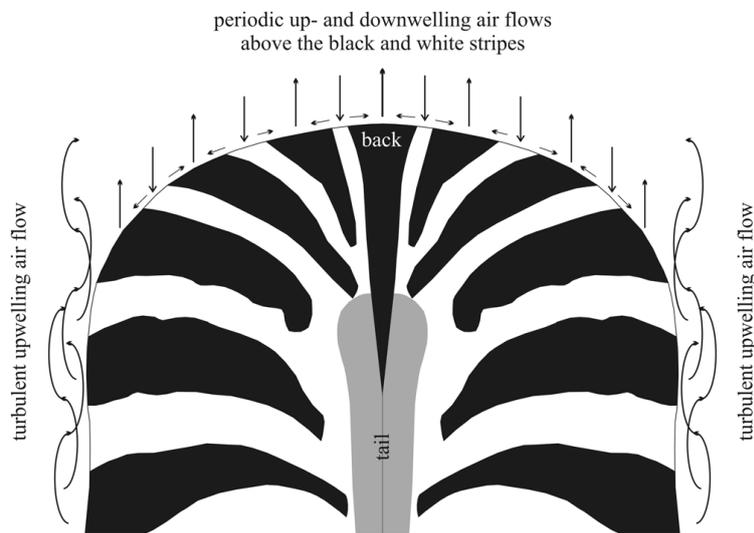


Figura 26. Representación esquemática de las corrientes de convección. Según la hipótesis de la termorregulación, se producen flujos de aire ascendentes (rayas negras) y descendentes (rayas blancas) Pero solo se podrían formar estas corrientes de aire en la región horizontal de la cebra (torso) pues en el resto del cuerpo sería caóticas y turbulentas. Imagen tomada de Gábor Horváth (2018) del artículo *Experimental evidence that stripes do not cool zebras*.

Según esta hipótesis, el aire a una mayor temperatura y humedad relativa (sudor) es sustituido por aire a menor temperatura y humedad relativa. Se producen principalmente pérdida del calor interior del animal por dos tipos de mecanismos (Figura 27):

- Pérdida de Calor Sensible. Debido a las pérdidas de calor para calentar nuevamente el aire.

- Pérdidas de Calor latente: Sucede cuando se produce la transpiración en el animal. En este caso, las corrientes convectivas sustituyen al aire “seco” (a humedad ambiente) por aire saturado en vapor (sudor).

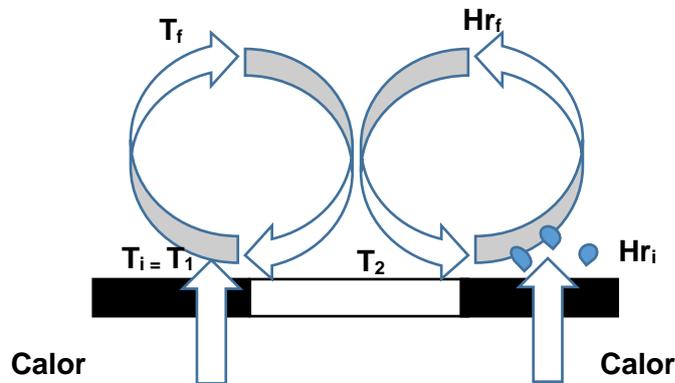


Figura 27. Esquema de los mecanismos de pérdida de calor. Calor Sensible y Calor Latente.

Pérdida de Calor Sensible: El flujo de calor (cantidad por unidad de tiempo) que se pierde debido al cambio de temperatura que se produce en el aire por el movimiento convectivo está dado por la cantidad de aire que circula en este movimiento. Una aproximación a este flujo es $Q = m C_e (T_i - T_f)$, donde m es el flujo másico, C_e el calor específico y T_i y T_f la temperatura del aire inicial (en contacto con el animal) y la final (aire enfriado al ascender), respectivamente. El flujo másico viene dado por la velocidad del aire (v) en el movimiento convectivo: $m = \rho A v$, con ρ la densidad del aire y A la superficie de contacto (en este caso la superficie del animal).

Por lo tanto, se puede poner en función de la velocidad, $Q = \rho A v C_e (T_i - T_f)$. Teniendo una estimación de la velocidad del aire y de los cambios de temperatura, podemos estimar esta pérdida de calor.

Pérdida de Calor Latente: tenemos una expresión para la cantidad de calor latente perdido. En este caso sería: $Q = V L_v (H_{a_i} - H_{a_f})$, siendo L_v el calor latente de vaporización y $H_{a_i} - H_{a_f}$ el cambio de humedad absoluta entre el exterior y la existente a nivel de la piel del animal. En este caso, depende del caudal del aire que circula: $V = A v$

Por lo que las pérdidas de calor latente son igual a: $Q = A v L_v (H_{a_i} - H_{a_f})$

Es decir, depende también de la velocidad y en este caso de las diferencias de humedades en la piel del animal y el exterior. Una estimación de esta velocidad podemos hacerla suponiendo que la energía que el flujo de aire absorbe del animal se libera al ambiente por conducción entre éste y el aire exterior. En este caso:

$Q = \rho A v C_e (T_i - T_f) = K_e A (T_i - T_a)$ donde el término de la derecha son las pérdidas por conducción entre la temperatura T_i y el ambiente, y K_e la conductividad térmica del aire.

Una estimación de la velocidad de circulación dentro de esta aproximación es:

$$v = \frac{K_e (T_i - T_a)}{\rho C_e (T_i - T_f)}$$

Se puede pensar que el aire en contacto con el animal y que asciende por diferencia de densidades acaba termalizándose con la temperatura ambiente en este caso la $T_f = T_a$. Así pues, la velocidad sería $v = \frac{K_e}{\rho C_e}$

Utilizando los valores en condiciones estándar (1 atm y 25°) de los parámetros característicos del aire ($\rho = 1,19 \text{ Kg/m}^3$; $K_e = 0,026 \text{ W/}^\circ\text{C m}$; $C_e = 1012 \text{ J/}^\circ\text{C kg}$), la velocidad es $v = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$

Esta velocidad se puede considerar subestimada ya que es poco probable que se alcanzase la termalización completa. Lo normal es que se produzca el enfriamiento del aire hasta una temperatura intermedia T_f , que debería estar entre las temperaturas de las rayas negras y blancas (T_1 y T_2) para explicar las corrientes de convección.

Por lo tanto, para tener un valor más realista de la velocidad a suponer, esta temperatura final sería:

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Considerando los resultados de este trabajo, podemos poner los siguientes valores medios:

Tabla 4. Valores medios de las temperaturas obtenidas en el trabajo.

$T_1 = T_i$	T_2	T_a	T_f	$T_1 - T_f$	$T_i - T_a$
38,96°C	37,17°C	31,80°C	38,07°C	0,90°C	7,16°C

Una velocidad más realista es: $v = 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ Y ahora podemos estimar las pérdidas de calor.

Calor sensible: $Q = 1,19 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,5 \text{ m}^2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \cdot 1012 \text{ J/}^\circ\text{C kg } 0,90^\circ\text{C}$

$Q = 0,47 \text{ W}$, donde se ha considerado el área normal del animal $A = 2,5 \text{ m}^2$

Calor latente: $Q = 2,5 \text{ m}^2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} \cdot 2257 \text{ kJ/kg} \cdot (0,032 - 0) \text{ kg/m}^3$

$Q = 31 \text{ W}$, donde se ha considerado el calor latente de vaporización $L_v = 2257 \text{ kJ/kg}$ y el caso extremo en que la humedad relativa con sudor es del 100% ($H_{a_i} = 0,032 \text{ kg/m}^3$) y para el exterior suponemos aire seco ($H_{a_f} = 0 \text{ kg/m}^3$).

Se observa que las pérdidas estimadas debido al efecto termorregulador de las rayas con los datos obtenidos en este trabajo varían desde 0,4 W en el caso de no existencia del fenómeno de sudoración en el animal hasta un máximo de 31 W, cuando hay presencia de éste. De todas formas, estas pérdidas son mucho menores que las que se producen debido a los fenómenos de convección tradicional por el movimiento del aire en la atmósfera, donde la velocidad media puede llegar a los varios m/s, por lo que no se puede justificar la hipótesis de Morris (1990) del enfriamiento por microcorrientes del aire generadas por las diferencias térmicas entre rayas. Sin embargo, se sugiere la necesidad de realizar una simulación más exacta de la hidrodinámica del problema para tener datos más fidedignos que corroborasen o no las aproximaciones realizadas, pero esto queda fuera del objetivo de este trabajo.

g. Discusión al problema de las rayas de las cebras

Las últimas aportaciones al estudio de las posibles funciones de las rayas de la cebra (de 2014 a 2018) han señalado principalmente dos hipótesis para explicar el porqué de la existencia de este pelaje tan particular de las cebras: por un lado, se han encontrado evidencias de que las rayas de la cebra impiden el ataque de las moscas mordedoras (tabánidos) en los trabajos de Caro et al *The function of zebra stripes* (2014) y *Zebra and biting flies: quantitative analysis of reflected light from zebra coats in their natural habitat* (2016) ; por otro lado, se ha demostrado que existe asociación entre el trazado de bandas y la temperatura gracias al estudio de Larison et al *How the zebra got its stripes: a problema with too many solutions* (2015)

Las otras teorías importantes, la del camuflaje anti-depredador, evitación de depredadores e interacción social ya habían sido rechazadas por sendos artículos de Caro et al. *The function of zebra stripes* y *Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans*.

Los dos únicos estudios multifactoriales (*The function of zebra stripes* y *How the zebra got its stripes: a problema with too many solutions*) tienen, sin embargo, varios puntos en los que concuerdan (Caro y Stankowich, 2015): 1) descartar la relación con la depredación de leones y el camuflaje, 2) suscitar dudas acerca de las distribuciones de las moscas tsé-tsé y el trazado de rayas, 3) cuestionar o descartar la idea de que las rayas pueden generar remolinos de enfriamiento en las piernas o cualquier otra parte del cuerpo, y 4) apuntar que la molestia de los tabánidos u otro tipo de mosca mordedora es el impulsor evolutivo de las rayas de los équidos, muy probablemente debido a las enfermedades que portan. En la Tabla 5, Caro y Stankowich resumen los hallazgos de dichos estudios:

Tabla 5. Resultados de los dos estudios multifactoriales. (Caro y Stankowich, 2015)

Hipótesis	Prueba comparativa (Caro et al.)	Prueba intraespecífica (Larison et al.)
Camuflaje	No	No
Depredación león	No	No
Interacción social	No	No probado
Glossinid (mosca tsé-tsé)	No (vientre sí)	No
Tabánido	Sí	No probado
Enfriamiento	No	Sí

Las limitaciones de ambos estudios se refieren a la falta de comprensión de hasta qué punto la temperatura y la humedad predicen la molestia de las moscas mordedoras, el alcance de las enfermedades que pueden transmitir y el mecanismo por el cual las rayas inhiben la presencia de tales insectos, aunque en este último caso y según Britten et al (2016), las rayas de las cebras frustran el comportamiento con orientación guiada visualmente de las moscas por medio de un mecanismo que es independiente de la polarotaxia.

El último estudio exhaustivo hasta ahora sobre las rayas de la cebra fue el de Åkesson et al. (2018), en el que se realizó un experimento de simulación a base de barriles cubiertos de patrones negros, blancos, grises y rayados. Descubrieron que no había diferencias importantes de temperatura entre los barriles rayados y los grises, por lo que concluyeron que las capas con rayas de cebra no mantienen el cuerpo más frío que las capas grises, desechando la hipótesis de un papel termorregulador de las rayas de cebra.

Es interesante señalar que como bien indican Larison et al. en concordancia con el trabajo de Caro et al., “creemos que la mejor interpretación de ambos análisis es reconocer una relación entre rayas y temperatura y trabajar para probar rigurosamente explicaciones alternativas como la termorregulación, evitar insectos picadores, prevenir

infecciones de parásitos y otros, al tiempo que reconocemos que es probable que la respuesta sea compleja con una miríada de factores que desempeñan un papel. Solo a través de experimentos de campo detallados y análisis estadísticos será posible descubrir la(s) causa(s) de este extraordinario fenómeno natural”.

Como propuesta de futuros estudios se podría indagar sobre las diferencias en relación con los capilares y glándulas sudoríparas entre rayas negras y blancas, puesto que, en climas cálidos, las cebras podrían enfriarse bien sudando mediante la acción glandular o alterando el flujo sanguíneo por la acción de los capilares. En el trascurso de este trabajo pude participar en la recogida de muestras de tejido para el inicio de trabajos de histológicos que verifiquen esta nueva hipótesis.

5. CONCLUSIONES

- Se han detectado diferencias térmicas entre las distintas regiones corporales de la cebra, siendo la región de los carrillos la que presenta la temperatura media más alta y la del costillar la más baja.

- El rango de temperaturas medias de nuestro estudio para cebra común (de 37,6°C a 38,7°C) se mantiene muy cercano a los valores normales de mantenimiento de la temperatura de otros solípedos (de 34°C a 38°C de promedio).

- Como cabría esperar, la temperatura ambiente se mostró correlacionada con la de las regiones corporales y con la registrada de manera particular en cada color de raya y en cada modelo de patrón. Los incrementos de temperatura ambiental no implicaron una elevación térmica clara en el caso de los carrillos y en aquella parte del cuello en la de patrón de rayas tipo 2 (P2).

- En nuestro estudio no se ha encontrado una simetría térmica bilateral. Esto ha sido debido posiblemente a las condiciones de la posición del animal durante la obtención de los registros.

- Encontramos diferencias térmicas ($p = 0,003762$ en rayas negras y $p < 0,0001$ en rayas blancas) entre las temperaturas medias de las rayas negras y las blancas de aproximadamente 1,8°C (de 38,96°C a 37,17°C), siendo lógicamente más elevada en las negras, pero esta diferencia térmica no resulta suficiente para dar lugar a mecanismos termodinámicos convectivos de efecto refrescante para el animal.

- Para resultados más reveladores y concluyentes sobre el papel adaptativo de la capa rayada de las cebras frente a las altas temperaturas, se precisa completar los

estudios termográficos con estudios histológicos y fisiológicos de los mecanismos de transpiración, y trabajando con un número mayor de animales bajo condiciones de temperatura ambiental definidas.ç

- Es fundamental el papel de conservación y de investigación que realizan los Parques Zoológicos con el fin de ofrecer un método práctico que nos sirva para evaluar y mejorar el bienestar animal. El uso de la termografía ha demostrado ser un sistema valioso para cumplir estos objetivos.

6. REFERENCIAS

- Åkesson, S., Horváth, G., Pereszlényi, A., Száz, D., Barta, A., Jánosi, IM., Geric, B. (2018). Experimental evidence that stripes do not cool zebras. *Scientific Reports*. Jun 19; 8 (1): 9351.
- Álvarez-Romero, J., Medellín RA. (2005). *Equus burchellii*. Vertebrados superiores exóticos en México: diversidad, distribución y efectos potenciales. Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México. Bases de datos SNIB-CONABIO. Proyecto U020. México. D.F.
- Bard, J. (1977) A unity underlying the different zebra striping patterns. *J. Zool., Lond.* 183, 527-539.
- Britten K., Thatcher T., Caro T. (2016) Zebras and biting flies: quantitative analysis of reflected light from zebra coats in their natural habitat. *PLoS One*. May 11(5)
- Caro, T., Izzo, A., Reiner, R Jr., Walker, H., Stankowich, T. (2014). The function of zebra stripes. *Nature Communications*. Apr 1; 5: 3535
- Caro, T., Stankowich T. (2015) Concordance on zebra stripes: a comment on Larison et al. *R Soc Open Sci*. Sep 2(9)
- Caro, T. (2016) *Zebra stripes*. Univ. Chicago Press, Chicago.
- Caro, T., Argueta, Y., Briolat, E., Bruggink, J., Kasprosky, M., Lake, J., Mitchell, M., Richardson, S., How, M. (2019). Benefits of zebra stripes: behaviour of tabanid flies around zebras and horses. *PLoS ONE* 14 (2): e0210831.
- Carroll, S. (1990) Zebra patterns in fly embryos: activation of stripes or repression of interstripes? *Rev Vol 60 Issue 1* pp 9-16.
- Cilulko, J., Janiszewski, P., Bogdaszewski, M., Szczygielska, E. (2013) Infrared thermal imaging in studies of wild animals. *European Journal of Wildlife Research* Vol 59: 17-23.
- Cott, HB. (1940). *Adaptative coloration in animals*. Oxford University. New York.
- Darwin, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. London: John Murray. Vol 1. 1st edition.
- Egri, A., Blahó, M., Kriska, G., Farkas, R., Gyurkovszky, M., Åkesson, S., Horváth, G. (2012). Polarotactic tabanids find striped patterns with brightness and/or

- polarization modulation least attractive: an advantage of zebra stripes. *Journal of Experimental Biology*. 215, 736–745.
- Fowler, M., Miller, R. (2007). Zoo and wild animal medicine, current therapy. *W.B. Saunders Company*. Philadelphia
- Freire de Souza, J., Araújo, J., Silva, V., Tavares, M., Nayhara, R., Oliveira, P., Lelis, L. (2018). Cutaneous evaporative thermolysis and hair coat surface temperature of calves evaluated with the aid of a gas analyser and infrared thermography. *COMPUT ELECTRON AGR*. 154: 222-226.
- Godfrey, D., Lythgoe J., Rumball, D. (1987). Zebra stripes and tiger stripes: the spatial frequency distribution of the pattern compared to that of the backgrounds significant in display and crypsis. *Biol. J. Linn. Soc.* 32, 427-433.
- Hogan, B., Cuthill, I., Scott-Samuel, NE. (2017). Dazzle camouflage and the confusion effect: the influence of varying speed on target tracking. *Animal Behaviour* 123, 349-353.
- How M, Zanker J. (2014). Motion camouflage induced by zebra stripes. *Zoology (Jena)* 117(3): 163-170.
- Kameya, T., Yamaoka, S. (1968). Effect on atmospheric conditions on skin temperature in horses. *Exp Rep Equine Health Lab* 5: 1-12.
- Kandasamy, N., Panneerselvam, S. (2008). Coat colour inheritance in horses. *Livestock Science* Vol 117, Tema 2-3: 109-129.
- Kingdon, J. (1984). The zebra's stripes: an aid to group cohesion? In *The Encyclopedia of Mammals* ed. MacDonald DW. 486–487 Allen & Unwin.
- Kruuk, H. (1972). *The spotted hyena: a study of predation and social behaviour*. University of Chicago Press. Chicago.
- Larison, B., Harrigan, R., Thomassen, H., Rubenstein, D., Chan-Golston, A., Li, E., Smith, T. (2015) How the zebra got its stripes: a problema with too many solutions. *Royal Society Open Science*. 2, 140452.
- Larison B., Harrigan RJ., Rubenstein DI., Smith TB. (2015) Concordance on zebra stripes is not black and White: response to comment by Caro & Stankowich *R Soc Open Sci*. Sep 2(9)
- Leonard, J., Rohland, N., Glaberman, S., Fleischer, R., Caccone, A., Hofreiter, M. (2005). A rapid loss of stripes: the evolutionary history of the extinct quagga. *Biology Letters*. Sep 22; 1(3): 291-5.
- Lythgoe, JN. (1979). *The ecology of vision*. Clarendon Press, Oxford.
- McCafferty, D. (2007). The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Rev*. Vol 37, N 3, 207-223.
- Melero, M., Casado, S., Sánchez-Vizcaíno, JM. (2009) Aplicación de la Termografía en la Valoración de la Fertilidad en Huevos de Cernícalo primilla. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias* 3 (2): 60-68.
- Melin, A., Kline, D., Hiramatsu, C., Caro, T. (2016). Zebra stripes through the eyes of their predators, zebras, and humans. *PLoS One*. Mar 17; 11(3): e0151660.
- Morris, D. (1990). *Observación de animales: una guía de campo para el comportamiento de los animales*. Jonathan Cape. London, UK.

- Mortola, J. (2013). Thermographic analysis of body Surface temperature of mammals. *Zoological Science*. 30 (2): 118-125.
- Mottram, J. (1916). An experimental determination of the factors which cause patterns to appear conspicuous in nature. *Proc. Zool. Soc. Lond.* 86, 383-419
- Parés i Casanova, P. (1994). Pelajes del caballo: identificación de capas y particularidades. Ediciones el Caballo SA. Barcelona.
- Rajabizadeh M., Behrooz, R., Kaboli, M., Nourani, E., Ahmadi, M., Shabani, A., Yousefi, M., Asadi, A. (2015). Habitat modeling and conservation of the endemic latifi's viper (montivipera latifii) in Lar National Park, Northern Iran. *Herpetological Conservation and Biology* 10(2): 572-582.
- Rodríguez Prieto, V., Rubio García, A., Sánchez-Vizcaíno, J. (2008). Utilización de la termografía en el ganado porcino. VII Congreso de Ciencias veterinarias. Facultad de Veterinaria, UCM (Madrid)
- Ruxton, G. (2002). The possible fitness benefits of striped coat coloration for zebra. *Mamm. Rev.* 32, 237–244.
- Sañudo, C. (2017). La reseña. Bases y Procedimiento. *Prensas Universitarias de Zaragoza*.
- Scott-Samuel, N., Baddeley, R., Palmer, C., Cuthill, I. (2011). Dazzle camouflage affects speed perception. *PLoS One* 6, e20233.
- Stevens, M. (2007). Predator perception and the interrelation between different forms of protective coloration. *Proc. R. Soc. B* 274, 1457-1464.
- Stevens, M. Searle, W., Seymour, J., Marshall, K., Ruxton, G. (2011). Motion dazzle and camouflage as distinct antipredator defenses. *BMC Biol.* 9, 81.
- Testé, E. y Denis, D. (2013). Bases para la fotoidentificación de las cebras (equus Burchelli) del Parque Zoológico Nacional de Cuba. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas* Vol 2 N° 2. pp 50-68
- Vaughan, TA. (1986). Mammology 3rd ed. North Arizona University, Flagstaff, USA.
- Wallace, AR. (1879). The protective colours of animals. *Science* 2, 128-137.
- Wolff, K., Goldsmith, L., Katz, S., Gilcrest, B., Paller, AS., Leffell, D. (2008). Fitzpatrick's dermatology in general medicine. McGraw-Hill Ed 7. New York.
- Páginas web: Bioenciclopedia <https://www.bioenciclopedia.com/cebra/>
(Fecha de acceso: 15/01/2018)
- Depositphotos <https://sp.depositphotos.com/stock-photos/cebra.html>
(Fecha de acceso: 12/09/2018)
- Ecoregistros.org-Registros Ecológicos de la Comunidad www.ecoregistros.org/ficha/Equus-quagga
(Fecha de acceso: 13/09/2018)
- Equus grevyi-Wikipedia, la enciclopedia libre https://es.wikipedia.org/wiki/Equus_grevyi
(Fecha de acceso: 13/09/2018)

La animalopedia <https://laanimalopedia.blogspot.com>

(Fecha de acceso: 20/09/2018)

Naturaleza a vista de pájaro, naturaleza y viajes <https://www.naturalezaavistadepajaro.com/>

(Fecha de acceso: 12/09/2018)

Quecomenn.com <http://www.quecomenn.com/que-comen-las-cebras/>

(Fecha de acceso: 12/11/2018)

StallionMexSearch www.Stallionmexsearch.com/por-que-los-caballos-no-deben-ser-abrigados-en-invierno

(Fecha de acceso: 07/09/2018)

Zoo de Barcelona <https://www.zoobarcelona.cat/en/animals/chapmans-zebra>

(Fecha de acceso: 20/09/2018)

COMPROMISO ÉTICO

Los procedimientos usados para este trabajo han sido debidamente aprobados por los servicios veterinarios del Parque Zoológico Municipal de Córdoba y no implican deterioro alguno para el bienestar del animal, estando de acuerdo con lo dispuesto en la correspondiente normativa europea en cuanto al cuidado y uso de animales de experimentación.

El estudio presentado es original y libre de plagio y las fuentes de información empleadas han sido citadas de manera correcta, no habiendo sido el trabajo ni total ni parcialmente publicado previamente.

AGRADECIMIENTOS

A las personas que han hecho que este trabajo se haya realizado, especialmente a los tutores académicos Evangelina Rodero Serrano y Rafael Guerra Caro. También a la profesora Ana González Martínez, proferora del Departamento de Producción Animal de la UCO por su eficaz ayuda en los análisis estadísticos. A Antonio Adolfo Rodero Serrano, profesor del Departamento de Física de la UCO por su ayuda en la simulación aproximativa sobre la termodinámica por convección, y a los cuidadores del Parque Zoológico Municipal de Córdoba por su imprescindible actuación para las mediciones correspondientes.