

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Instituto de Ciencias Agrícolas

Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias



**EFECTO DEL ESTRÉS POR CALOR ESTACIONAL SOBRE
LA FISIOLÓGÍA Y FERTILIDAD DE SEMENTALES DORPER
CRIADOS EN UN CLIMA DESÉRTICO**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

PRESENTA

ALEJANDRA LIZET BARRAGÁN SIERRA

DIRECTOR

DR. ULISES MACÍAS CRUZ

CODIRECTOR

DR. RICARDO VICENTE PÉREZ

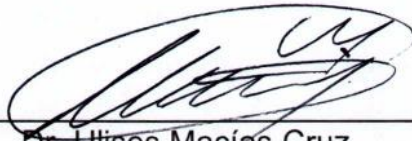
MEXICALI, B.C., MÉXICO

NOVIEMBRE 2023

La presente tesis “Efecto del estrés por calor estacional sobre la fisiología y fertilidad de sementales Dorper criados en un clima desértico” realizada por la C. **Alejandra Lizet Barragán Sierra**, dirigido por el **Dr. Ulises Macías Cruz**, ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Comité Particular



Dr. Ulises Macías Cruz
Director de Tesis



Dr. Ricardo Vicente Pérez
Co-director de tesis



Dr. Leonel Avendaño Reyes
Secretario



Dra. María de los Angeles López Baca
Sinodal



Dr. José Alejandro Roque Jiménez
Sinodal

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Ciencias Agrícolas, por abrirme las puertas para realizar mis estudios de posgrado.

Al CONACYT, por financiar mis estudios de doctorado.

A mi director de tesis, el Dr. Ulises Macías Cruz, gracias por la paciencia infinita, compartir sus conocimientos, y el enriquecimiento personal.

A los doctores Leonel Avendaño Reyes y Abelardo Correa Calderón, que además de integrar mi comité, me brindaron su conocimiento durante mis clases en el doctorado, y me ofrecieron su mano.

A los doctores Ricardo Vicente Pérez y Raúl Díaz Molina, que a pesar de no haber convivido personalmente con ellos, siempre sentí un apoyo incondicional de su parte para enriquecer mi conocimiento y mejorar mi proyecto.

Al M.C. Marco A. Contreras Silva y a la Asociación Ganadera Local de Mexicali, por darme la oportunidad de utilizar para mi experimento a sus sementales y terreno, respectivamente.

A mis amigos, familia y pareja, que siempre me motivaron hasta el cansancio.

A mis padres, que jamás soltaron mi mano.

DEDICATORIA

A mis PADRES, Rosy y Javier,
por su apoyo incondicional.
Sin ustedes, esta tesis no existiría.

A toda mi FAMILIA,
porque me quieren, y
siempre creyeron en mí.

A mis AMIGOS,
que a pesar de las distancias,
estuvieron presentes para
escucharme y motivarme.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos	3
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Importancia del ovino de pelo en México	4
2.2. Fisiología de la reproducción del carnero	7
2.2.1. Pubertad	8
2.2.2. Espermatogénesis	9
2.2.3. Control endócrino.....	12
2.3. Actividad reproductiva del carnero de pelo	15
2.4. Estrés calórico y actividad reproductiva del carnero de pelo en climas cálidos	18
2.5. Literatura citada	23
CAPÍTULO III. ARTÍCULOS	34
3.1. Termorregulación y respuestas reproductivas de carneros bajo estrés calórico. Revisión	34
3.1.1. Resumen	35
3.1.2. Abstract.....	35
3.1.3. Introducción	36
3.1.4. Ovinos en climas cálidos	37
3.1.5. Estrés por calor y la producción ovina	38
3.1.6. Estrés por calor y termorregulación del carnero	39
3.1.7. Estrés por calor y endocrinología reproductiva del carnero	42
3.1.8. Estrés por calor y capacidad reproductiva del carnero	44
3.1.9. Mitigación del estrés por calor en carneros	48

3.1.10. Conclusiones	50
3.1.11. Literatura citada	50
3.1.12. Cuadros y Figuras.....	59
3.2. El estrés calórico estacional compromete la termorregulación testicular y calidad seminal de carneros raza Dorper criados en clima desértico	62
3.2.1. Resumen	63
3.2.2. Introducción	63
3.2.3. Materiales y métodos.....	65
3.2.4. Resultados.....	68
3.2.5. Discusión	69
3.2.6. Conclusiones	73
3.2.7. Referencias.....	73
3.2.8. Cuadros y figuras.....	78
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES GENERALES.....	86
APÉNDICE. PUBLICACIONES	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Cambios que se presentan en las variables fisiológicas de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.....	59
Cuadro 2.	Cambios que se presentan en los metabolitos sanguíneos de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.....	60
Cuadro 3.	Cambios que se presentan en las características seminales de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.....	61
Cuadro 4.	Condiciones climáticas durante la primavera y el verano en una zona desértica.....	78
Cuadro 5.	Efectos del estrés por calor estacional (verano vs. primavera) sobre la frecuencia respiratoria (TR), la temperatura rectal (TR) y la temperatura del pelaje de carneros Dorper añales en condiciones desérticas	79
Cuadro 6.	Efectos del estrés por calor estacional (verano vs. primavera) en la biometría testicular de carneros Dorper añales en condiciones desérticas	80
Cuadro 7.	Efectos del estrés por calor estacional (verano vs. primavera) sobre las características seminales de los carneros Dorper añales en condiciones desérticas.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Concentraciones relativas en sangre de GnRH, LH y FSH en machos.....	7
Figura 2.	Fases de diferenciación de las espermátides.....	12
Figura 3.	Vías de afectación de la calidad seminal en carneros de pelo sujetos a estrés por calor.....	20
Figura 4.	Esquematización del muestreo y evaluación de variables de estudio.....	82
Figura 5.	Patrones diurnos del índice temperatura-humedad (THI) y temperatura ambiental durante los períodos de primavera y verano.....	83
Figura 6.	Efectos de la interacción estación x semana sobre el perímetro del cordón espermático, longitud escrotal y circunferencia escrotal de carneros Dorper añales en condiciones desérticas.....	84
Figura 7.	Efectos de la interacción estación x semana sobre la motilidad de la masa de espermatozoides y el porcentaje de motilidad de los espermatozoides y anomalías de carneros Dorper de un año en condiciones desérticas.....	85

RESUMEN

Los ovinos Dorper son una raza de pelo cárnica que se encuentra ampliamente distribuida en el mundo debido su desempeño productivo. Particularmente, se usa como línea paterna en esquemas de cruzamientos con razas nativas de la región con bajo potencial de crecimiento. No obstante, hay evidencias de que la hipertermia testicular afecta negativamente su proceso de espermatogénesis y fertilidad, por lo que es necesario establecer si esto también prevalece en condiciones naturales de estrés por calor (EC) como las registradas en veranos de zonas desérticas. Por lo anterior, se realizó un estudio con 10 sementales Dorper para evaluar el efecto de EC estacional (35 d en primavera [$T_a = 26.9 \pm 5.6$ °C] vs 35 d en verano [$T_a = 36.6 \pm 2.0$ °C]) en las respuestas fisiológicas, biometría testicular y calidad seminal en clima desértico. La temperatura rectal, frecuencia respiratoria y la temperatura de pelaje en diferentes regiones del cuerpo se midieron cada 7 días (0600, 1200 y 1800 h); además, se registró la biometría testicular a las 0600 h. El semen se recolectó a través de una vagina artificial 3 días después de las mediciones de variables fisiológicas y se evaluaron los rasgos seminales. La temperatura rectal, la tasa de respiración y las temperaturas de pelaje fueron más altas ($P < 0.01$) en cada hora de medición en verano en comparación con la primavera. La longitud y volumen testiculares, y la circunferencia escrotal fueron mayores ($P < 0.01$) en verano que en primavera. En comparación con las condiciones de primavera, el EC de verano provocó una menor concentración y viabilidad de espermatozoides ($P \leq 0.05$) sin afectar el volumen de eyaculación. Además, el EC de verano provocó una disminución ($P \leq 0.03$) de la motilidad masal a partir de la tercera semana y de la motilidad espermática a partir de la cuarta semana, así como un aumento de las anomalías espermáticas ($P < 0.01$) a lo largo de las cinco semanas con un aumento gradual. En conclusión, los carneros Dorper son capaces de mantener la normotermia en condiciones de HS de verano en una región desértica, pero su termorregulación testicular no es efectiva en dichas condiciones climáticas para evitar la hipertermia testicular, lo que disminuye la calidad seminal.

Palabras Clave: Calidad seminal, espermatogénesis, hipertermia testicular, ovinos de pelo.

ABSTRACT

Dorper sheep are a meat hair breed with widely distributed throughout the world. Particularly, this breed is used as paternal line in crossbreeding schemes with low-growth potential native breeds. There is evidence that testicular hyperthermia negatively affects the process of spermatogenesis and fertility, so it is necessary to establish whether this also prevails in outdoor heat stress (HS) conditions such as those recorded in summer of desert regions. Therefore, 10 Dorper rams were used to evaluate the seasonal HS effects (35 d at spring [$T_a = 26.9 \pm 5.6$ °C] vs 35 d at summer [$T_a = 36.6 \pm 2.0$ °C]) on physiological responses, testicular biometry, and seminal quality under desert climatic conditions. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures from different body regions were measured every 7 d (0600, 1200, and 1800 h); also, testicular biometry was registered at 0600 h. Seminal quality was evaluated in semen sampling collected by artificial vagina 3 d after measuring physiological variables. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures were higher ($P < 0.01$) at each hour of measurement in summer compared to spring. Overall, scrotal length and circumference, as well as testicular volume were higher ($P < 0.01$) in summer than in spring. Compared to spring conditions, summer HS caused lower ($P \leq 0.05$) sperm concentration and viability without affecting ejaculate volume. In addition, summer HS caused decreased ($P \leq 0.03$) mass motility from the third week and sperm motility from the fourth week, as well as increased sperm abnormalities ($P < 0.01$) throughout the five weeks with a gradual increase. In conclusion, Dorper rams were capable to maintain normothermia under summer HS conditions in a desert region, but their testicle thermoregulation is not effective in these climatic conditions to avoid testicle hyperthermia, decreasing the seminal quality.

Keywords: Hair sheep, seminal quality, spermatogenesis, testicular hyperthermia.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En el último siglo se ha generado una producción y acumulación excesiva de gases efecto invernadero, los cuales impiden la salida de la radiación infrarroja de la tierra y al mismo tiempo facilitan la entrada de la radiación solar (Sejian *et al.*, 2017). Esta situación condujo a que se presentara un fenómeno conocido como efecto invernado, el cual ha provocado que aumentara la temperatura ambiental de la tierra, generando calentamiento global (Bett *et al.*, 2017; Tichenor *et al.*, 2017). Así como consecuencia, se estima que para finales del siglo XXI incrementará la temperatura atmosférica global de 2.6 a 4.8 °C (IPCC, 2014). De este modo, la proporción de regiones con clima desértico está incrementando en todo el mundo, lo que expone a los animales ubicados en estas zonas a estrés por calor (EC). Las altas temperaturas ambientales que prevalecen en las épocas más calientes de estas regiones comprometen tanto el bienestar como la fertilidad de los animales (Thornton *et al.*, 2021).

Los pequeños rumiantes domésticos como ovinos y caprinos han mostrado ser más efectivos en tolerar temperaturas altas que otras especies de producción (Sejian *et al.*, 2018). Dentro de los ovinos, los de raza de pelo comparados con los de lana se adaptan con mayor facilidad a condiciones ambientales calientes, lo cual se atribuye a características fenotípicas, fisiológicas y metabólicas, así como a que son portadores de genes de termo-tolerancia (Vicente-Pérez *et al.*, 2020). De hecho, la adaptación que presentan los ovinos de pelo es tal, que estudios recientes han evidenciado que el EC no provoca en las hembras cambios en la actividad estral y ovárica, ni en su comportamiento reproductivo (Gastelum-Delgado *et al.*, 2015; Macías-Cruz *et al.*, 2015; Macías-Cruz *et al.*, 2016). De la misma manera, los estudios acerca de los sementales de pelo afirman que poseen gran capacidad de resiliencia frente al calor y mantienen su actividad reproductiva y apetito sexual durante todo el año (Kahwage *et al.*, 2018; Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2015). Sin embargo, se ha observado que a nivel de calidad seminal, el EC produce una disminución en la motilidad, concentración, y viabilidad espermática (Carrascal-Triana *et al.*, 2022; Teodoro *et al.*, 2013), así como

un incremento de las anomalías espermáticas (Mohamed *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2019)

La espermatogénesis es el proceso a través del cual se producen los espermatozoides y es muy sensible a variaciones de temperatura testicular; por lo que la temperatura óptima del testículo oscila entre los 32 a 36 °C (McManus *et al.*, 2020). Por consiguiente, los testículos de los sementales de pelo cuentan con tres mecanismos de termorregulación, los cuales permiten mantener relativamente constante la temperatura interna del testículo: 1) un escroto con alta cantidad de glándulas sudoríparas, 2) el músculo cremáster que se retrae o se relaja para aprovechar o evitar la ganancia de calor corporal, y 3) el sistema plexo pampiniforme que permite termorregular esta zona a través del sistema de irrigación sanguínea escrotal (Senger, 2012). Dada la posición ventral y pendular de los testículos en los carneros, la temperatura de estos puede ser incrementada con cierta facilidad en condiciones climáticas calientes, provocándose una degeneración testicular (Rodríguez, 2014). Un aumento en la temperatura testicular se asocia positivamente con el metabolismo celular, situación que conduce a un mayor nivel de estrés oxidativo que provoca degeneración y pérdida de células germinales (Lue *et al.*, 1999). Las elevadas temperaturas también interfieren en el funcionamiento de los sistemas hipotálamo-hipofisarios, por lo que pueden disminuir la producción de testosterona por vía neuro-endocrina y metabólica (Binsiya *et al.*, 2017; Sejian *et al.*, 2017).

Dentro de los sementales de pelo, se ha observado que la raza Dorper resulta especialmente susceptible a este tipo de daño espermático, debido a que presenta dificultades para mantener normotermia testicular bajo condiciones de EC. A pesar de lo anterior, la calidad seminal de estos sementales no se vio afectada (Moura *et al.*, 2019). Cabe señalar que los estudios referentes a sementales de pelo se han realizado principalmente bajo condiciones tropicales (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2015; Kahwage *et al.*, 2018; Carrascal-Triana *et al.*, 2022), y semi-desérticas (Mohamed *et al.*, 2012; Sánchez-Dávila *et al.*, 2020). Por lo anterior, es imperioso conocer el grado de daño seminal que pudieran ocasionar las temperaturas de clima desértico, en una raza de pelo tan ampliamente distribuida como lo es la Dorper.

1.1. Hipótesis

La calidad seminal de los sementales de raza Dorper se reduce bajo condiciones de estrés por calor en la época de verano de regiones desérticas porque priorizan la activación de mecanismos de termorregulación fisiológicos para mantener normotermia general, a expensas de la termorregulación testicular y procesos reproductivos.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar los efectos del estrés por calor natural que prevalecen en los veranos de regiones desérticas sobre la activación de mecanismos de termorregulación fisiológicos corporales, termorregulación testicular y calidad seminal de sementales de raza Dorper.

Objetivos particulares

1. Determinar el impacto del estrés por calor de verano *versus* condiciones termoneutrales de primavera en la temperatura rectal, frecuencia respiratoria y temperaturas de superficie corporal de sementales de raza Dorper mantenidos bajo condiciones de un clima desértico.
2. Determinar el impacto del estrés por calor de verano *versus* condiciones termoneutrales de primavera en medidas biométricas testiculares y temperatura escrotal de sementales de raza Dorper mantenidos bajo condiciones de un clima desértico.
3. Valorar el impacto del estrés por calor de verano *versus* condiciones termoneutrales de primavera en el volumen de eyaculado, concentración y viabilidad espermática, medidas biométricas testiculares y temperatura escrotal de sementales de raza Dorper mantenidos bajo condiciones de un clima desértico.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia del ovino de pelo en México

El ganado ovino descende del muflón euroasiático (*Ovis musimon/Ovis orientalis*), y se estima que su domesticación ocurrió hace aproximadamente 9,000 a 11,000 años. Su ingreso a México se dio a finales del siglo XIV, época en que los españoles llegaron a América y comenzaron a traer consigo ganado para trabajo y consumo personal (Aguilar-Martínez *et al.*, 2017). Las principales razas introducidas fueron: Manchega, Churra, y Lacha, por lo que los ovinos domésticos que encontramos actualmente en México descienden de estas razas. A partir de su llegada, se inician los sistemas trashumantes y lentamente comienza la distribución de los rebaños desde la costa al centro de la república en función de la disponibilidad de terreno y alimentación (Romero, 2012). Durante el siglo XX, se producen grandes cambios en la ovinocultura mexicana, ya que en 1915 llega la reforma agraria durante la revolución, en la que se dividieron grandes tierras para asignarlas a los miembros más pobres de la sociedad para que practicasen la agricultura; y a finales de este siglo, surge el tratado de libre comercio, con el que incrementaron notablemente las importaciones y exportaciones de carne y subproductos de ovinos (De Ita, 2019).

El principal producto obtenido del ovino es su carne, y su producción a nivel nacional ha ido incrementando en los últimos 10 años a un ritmo de aproximadamente 1,000 toneladas por año, yendo de 54,830 t en 2010 hasta 65,150 t en 2020 (SIAP, 2021). En años previos al 2017, México importaba cerca de 10,000 t de carne de ovino desde Nueva Zelanda, Estados y Australia (principalmente), para poder abastecer la demanda de la población; hoy en día se importan menos de 8,000 t al año (FAOSTAT, 2022). Además, en los últimos 8 años incrementó 3.17% el ganado en pie en el país, dando un total de 8.76 millones de cabezas ubicadas mayormente en el Estado de México (15.5%), Hidalgo (12.5%), Veracruz (8.3%), Puebla (6.2%), y Zacatecas (5.7%; SIAP, 2021). A pesar de la notable tendencia a incrementar el autoabastecimiento nacional, el consumo aparente de la carne de ovino se mantuvo en ~0.6 kg/habitante/año desde 2011 hasta 2019 (INEGI, 2022; FAOSTAT, 2022). Este consumo per cápita descendió a ~0.5 kg en 2020 y 2021 durante la pandemia por

COVID-19, probablemente a causa de la disminución en las importaciones de carne en esos años (1,046 y 391.2 t, respectivamente; Bobadilla-Soto *et al.*, 2021; FAOSTAT, 2022).

Es evidente que aún existe una demanda insatisfecha de carne ovina en México, y el consumo nacional sigue dependiendo mucho de las importaciones (Bobadilla-Soto *et al.*, 2021). Parte de esta problemática radica en que los pequeños productores poseen cerca del 80% del rebaño nacional, y en ocasiones utilizan sus animales para autoconsumo (<10% de su producción) o para obtener ingresos de emergencia. El resto de los productores posee un mayor nivel de tecnificación en su manejo e instalaciones. Lo anterior, ocasiona que la mayor parte del producto ofertado no sea de alta calidad, por lo que el consumidor prefiere adquirir las canales derivadas de producciones tecnificadas, o bien, conseguir carne congelada que es introducida desde el extranjero (Hernández-Marín *et al.*, 2017). Dada la fuerte demanda de carne ovina por el mercado de la barbacoa (hasta un 90 a 95% del consumo nacional), se presenta la oportunidad de comercialización para los pequeños productores. Sin embargo, cerca del 80% de los productores vende su ganado en pie, lo que resulta en la subestimación de la calidad y el peso de los ovinos ofertados (Hernández-Martínez *et al.*, 2013). Por lo anterior, se busca que los ovinocultores incrementen su tecnificación para mejorar el aprovechamiento de su producto, todo sin perder de vista las fluctuaciones en los precios de los insumos agrícolas, los cambios climáticos y los nichos de mercado (Hernández-Marín *et al.*, 2017).

Afortunadamente, los ovinos tienen la capacidad para aprovechar alimento de mala calidad y convertirlo en productos de consumo humano (p. ej. carne, lana, piel, leche), lo que los convierte en ganado muy rentable; aunque la producción puede variar por el ambiente o las características fenotípicas y genotípicas del rebaño (Hernández-Marín *et al.*, 2017; Vicente-Pérez *et al.*, 2020). Las principales razas de lana que podemos encontrar en México son: Suffolk, Charollais, Texel, Dorset, Rambouillet; entre las razas de pelo más utilizadas están: Katahdin, Dorper, Pelibuey y Blackbelly. Y aunque en el presente no existe un inventario de la cantidad de ovinos de lana y pelo en el país, un estudio reciente donde se caracterizaron las canales de los estados con mayor producción de carne, mostró que 54.1% de los ovinos

sacrificados tenían ambos progenitores de raza de pelo, un 23.5% eran cruces de pelo y lana, y solo 12.2% provenían de razas de lana (Partida de la Peña *et al.*, 2017). Lo anterior hace evidente que actualmente predominan las razas de pelo para la producción de carne ovina en México.

Alrededor de 1930 a 1940 ingresaron los primeros ovinos de pelo a México por la península de Yucatán, pero no fue hasta la época de los 90s que las fibras sintéticas sobrepasaron la lana en la industria textil, y las razas de pelo comenzaron a cobrar más importancia en la producción ovina (Aguilar-Martínez *et al.*, 2017; Textile Exchange, 2021). También, al provenir de climas cálidos, las razas de pelo poseen características fenotípicas, que los hacen menos susceptibles al calor en comparación con los ovinos de lana (Vicente-Pérez *et al.*, 2020); esto resulta muy útil en México, ya que en el 81.98% del territorio predominan los climas cálido subhúmedo, seco y desértico (SEMARNAT, 2015). Otro punto importante es que, como un subproducto, la piel de ovino de pelo es más apreciada debido a que posee mayor resistencia y suavidad que la piel de razas de lana (Costa *et al.*, 2006). Además, el ovino de pelo presenta menor debilidad ante parásitos, enfermedades, y escasez de nutrientes y agua, en comparación con los ovinos de lana (Hernandez *et al.*, 2022). Y desde el punto de vista reproductivo, los ovinos de pelo inician la pubertad a una edad más temprana; y muestran poca o nula estacionalidad, lo que les proporciona a las hembras: mayor número de partos y prolificidad al año, y a los machos: fertilidad deseable durante todo o la mayor parte del año (Hafez y Hafez, 2013; McManus *et al.*, 2020).

Con todo lo mencionado previamente, el ovino de pelo resulta ser un excelente recurso para seguir incrementando la producción de carne, cubriendo cada vez más el autoconsumo nacional, mejorando los ingresos de los pequeños productores y la seguridad alimentaria (Hernández-Marín *et al.*, 2017). Más aún, con el potencial que tienen estos animales para protagonizar negocios sustentables.

2.2. Fisiología de la reproducción del carnero

En los carneros, el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG) es el encargado de controlar la producción de los gametos masculinos (espermatozoides) en los testículos. El primer participante es el hipotálamo, por medio de pulsaciones de hormona reguladora de gonadotropinas (GnRH; Senger, 2012). Las secreciones pulsátiles de GnRH estimulan la hipófisis para la liberación de hormona folículo estimulante (FSH) y hormona luteinizante (LH; Figura 1). Esta última ejerce su función en las células de Leydig que se encuentran en el intersticio de los testículos, provocando la liberación de testosterona (TES; Hafez y Hafez, 2013). También en los testículos, a lo largo de la membrana basal de los túbulos seminíferos, se encuentran las células de Sertoli (órgano blanco de FSH), que, en conjunto con las células mioides peritubulares, ayudan a proporcionar estructura al túbulo seminífero (Senger, 2012). Las células de Sertoli poseen receptores de FSH y TES, y sintetizan hormonas que establecen el feedback negativo para regular la producción de gonadotropinas a nivel de hipotálamo-hipófisis (Sengupta *et al.*, 2019). Entre las funciones que tiene la TES encontramos: el funcionamiento de las glándulas sexuales accesorias, el desarrollo de caracteres sexuales secundarios y del apetito sexual.

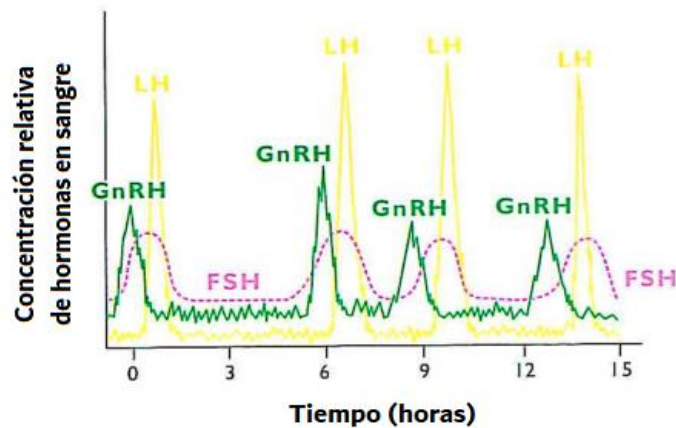


Figura 1. Concentraciones relativas en sangre de GnRH, LH y FSH en machos (obtenido de Senger, 2012).

Además del control por parte del eje HHG, existe la regulación autocrina y paracrina que aportan las células de Leydig y Sertoli dentro de los mismos testículos, así como la participación de “mensajeros químicos” (p.ej. los factores de crecimiento;

Hafez y Hafez, 2013). Las hormonas mencionadas son las principales responsables de la multiplicación y diferenciación de las células germinales hasta liberar la forma más especializada de los espermatozoides (Staub y Johnson, 2018). Todos los mecanismos involucrados en la etapa reproductiva de los carneros se describirán a detalle a continuación:

2.2.1. Pubertad

La pubertad no es un suceso que ocurre de golpe, sino que es algo que se da de forma paulatina, el período prepuberal en los ovinos inicia alrededor de las 23.1 semanas, y gradualmente van madurando hasta iniciar la pubertad a las 28.2 ± 0.8 semanas de edad (Souza *et al.*, 2010). Se considera que un carnero ha llegado a la pubertad cuando comienza a expresar conductas sexuales (montas y erecciones), cuando tienen su primera eyaculación, o cuando comienzan a aparecer los espermatozoides en su eyaculado; en términos generales, la pubertad se alcanza cuando los carneros se han desarrollado y son capaces de reproducirse (Senger, 2012). En este sentido, el crecimiento significativo de los testículos finaliza entre la semana 36 a 38, por lo que esta es la edad en la que se podría estimar que el carnero ha alcanzado su madurez sexual (Souza *et al.*, 2010).

Se sabe que el requerimiento fundamental para el inicio de la pubertad es que la GnRH se secrete en la cantidad y frecuencia suficientes para estimular la secreción hipofisiaria de FSH y LH. Aun así, las neuronas hipofisarias que secretan la GnRH ya se encuentran completamente desarrolladas en su morfología y distribución, previo al inicio de la pubertad (Hafez y Hafez, 2013). Incluso durante la etapa neonatal, el cerebro de los machos se “desfeminiza” a causa de la TES que atraviesa la barrera hematoencefálica y es constantemente transformada en estradiol (E2) por la enzima aromatasa. La testosterona y el estradiol están ejerciendo siempre una retroalimentación sobre las neuronas liberadoras de GnRH. A medida que se acerca la pubertad, las neuronas GnRH, gradualmente se vuelven menos sensibles a la retroalimentación negativa de la TES y el E2, por lo que se necesitan cada vez mayores cantidades de ambas hormonas para inhibirlas. Paulatinamente, el hipotálamo es

capaz de secretar más y más GnRH y, por lo tanto, estimular la hipófisis para más y más FSH/LH, lo que estimula el desarrollo de los testículos y la producción de espermatozoides (Senger, 2012). Desde luego, llega un punto en que la producción de todas estas hormonas se estabiliza, alcanzando los niveles séricos de un carnero adulto.

Todos los cambios necesarios para llegar a la pubertad se encuentran estrechamente relacionados con factores intrínsecos (inherente al animal) y extrínsecos (del ambiente); la dieta, el estrés, el ritmo circadiano y las señales olfativas, son solo algunos ejemplos de los factores extrínsecos que influyen sobre el sistema secretor de GnRH (Ebling, 2005). Genéticamente hablando, los ovinos originarios de clima templado pueden presentar la pubertad entre los 6 a 18 meses de edad; las razas de origen tropical (como las razas de pelo) inician pubertad en un periodo más corto, entre los 6 a 9 meses (Hafez y Hafez, 2013). Por otro lado, la nutrición prepuberal parece ser un factor clave en el proceso dinámico de la pubertad, debido a que impacta directamente en el desarrollo de la capacidad funcional de las células de Leydig durante la etapa adulta temprana (Anand-Ivell *et al.*, 2019). Por ejemplo, los corderos que consumen dietas con mayor contenido de energía o proteína tienden a desarrollar más rápido sus testículos y a tener una mayor producción de espermatozoides a temprana edad, esto asociado a un incremento en la adiposidad (Martinez *et al.*, 2012; English *et al.*, 2018); las células adiposas producen una hormona conocida como leptina, la cual se encuentra fuertemente relacionada con la edad a la pubertad de los carneros. Por otro lado, en un entorno metabólico desfavorable, la pubertad se puede retrasar por deficiencias de insulina o glucosa, y altas concentraciones de ácidos grasos no esterificados (Rosales Nieto *et al.*, 2019).

2.2.2. Espermatogénesis

La espermatogénesis es el proceso por el cual se generan los gametos masculinos o espermatozoides. Se trata de un evento continuo que ocurre por primera vez durante la pubertad de los sementales en respuesta a la producción e incremento gradual de gonadotropinas y TES. En condiciones óptimas, la producción de

espermatozoides se estabiliza cuando el semental ha alcanzado su madurez sexual y se mantiene por el resto de su vida, solo decayendo ligeramente durante la vejez (Sengupta *et al.*, 2019). Dicho proceso se desarrolla en el epitelio basal de los túbulos seminíferos de los testículos. Las células germinales más inmaduras (espermatogonias) están ubicadas en la periferia de la cápsula seminífera y a medida que estas células germinales proliferan y maduran, se mueven hacia la luz del túbulo. Entre las células que encontramos en el túbulo seminífero, en orden de menor a mayor especialización, comienza con las espermatogonias, los espermatocitos, las espermátides, y los espermatozoides (Senger, 2012). Las espermatogonias son las células madre de los espermatozoides, son diploides, y constantemente se están multiplicando por mitosis; van desde indiferenciadas (tipo A₀), las tipo A₁ a A₄, las intermedia (I), hasta las tipo B (Mäkelä y Hobbs, 2019). Las espermatogonias tipo B pasan por una última división mitótica y generan espermatocitos primarios, estos a su vez, hacen su división por meiosis. El resultado de la meiosis I son los espermatocitos secundarios, y el resultado de la meiosis II son las espermátides; al pasar por la segunda división meiótica quedarán con la mitad del material genético (haploides), y ya solo se especializarán hasta evolucionar a espermatozoides (Senger, 2012). Los espermatozoides diferenciados, pasan a la *rete testis* y posteriormente son llevados a la cabeza del epidídimo por medio de los conductos eferentes. El epidídimo posee cuerpo y cola, y es aquí donde el espermatozoide concluye su maduración y adquiere parte de su capacidad fecundante (Hafez y Hafez, 2013).

El proceso de espermatogénesis se puede subdividir en tres fases: La primera fase es conocida como *fase de proliferación mitótica o espermatocitogénesis*: consta de generar un gran número de espermatogonias a consecuencia de sus divisiones mitóticas (Senger, 2012). Durante este proceso de proliferación, las espermatogonias tipo A, a medida que se dividen van dando origen a generaciones más especializadas que la anterior, las tipo A₂, A₃ y A₄; algunas de ellas adquieren un papel de renovación de células madre (tipo A₂), que tienen la capacidad de dar origen a más espermatogonias y permitir que la espermatogénesis continúe a lo largo de los años. Las espermatogonias A₄ se dividen para formar las de tipo intermedias, y posteriormente las tipo B, que se dividirán para volverse espermatocitos (Hafez y

Hafez, 2013). La segunda fase, se conoce como *fase meiótica*: involucra espermatocitos primarios y secundarios; durante esta fase, se garantiza diversidad genética por la replicación cruzada del ADN; el cruzamiento de ADN ocurre en la profase de la meiosis I. El objetivo final de la fase es generar espermátides haploides que posean la mitad de los cromosomas de la célula madre, pero diferentes entre sí (Singh y Gupta, 2019). Finalmente, durante la tercera fase, conocida como *fase de citodiferenciación o espermiogénesis*, una espermátide esférica no diferenciada, sufre una transformación que resulta en un espermatozoide altamente especializado (Senger, 2012).

De manera más específica, la transformación que sufren las espermátides durante la citodiferenciación se divide en 4 fases (Figura 2):

- 1) *Fase de Golgi (a)*: se forman abundantes gránulos en el aparato de Golgi, los cuales se fusionan en un solo gránulo acrosómico que se adhieren a la envoltura nuclear; comienza la formación del flagelo.
- 2) *Fase de capuchón (b)*: el gránulo acrosómico se esparce formando un saco membranoso que comienza a recubrir la porción anterior del núcleo; inicia el desarrollo de los componentes axonémicos de la cola (Hafez y Hafez, 2013).
- 3) *Fase acrosómica (c)*: el núcleo comienza a elongarse y el acrosoma se extiende hasta cubrir dos tercios del núcleo anterior; un sistema de microtúbulos recubre el núcleo posterior y se extiende hacia el flagelo en desarrollo, y comienza a formarse el anillo que une la cabeza y la pieza media
- 4) *Última fase o de maduración (d)*: una gran cantidad de mitocondrias se agrupan en espiral sobre el flagelo y forman la pieza media. Finalmente, se da la espermiación o liberación de espermatozoides maduros (Senger, 2012).

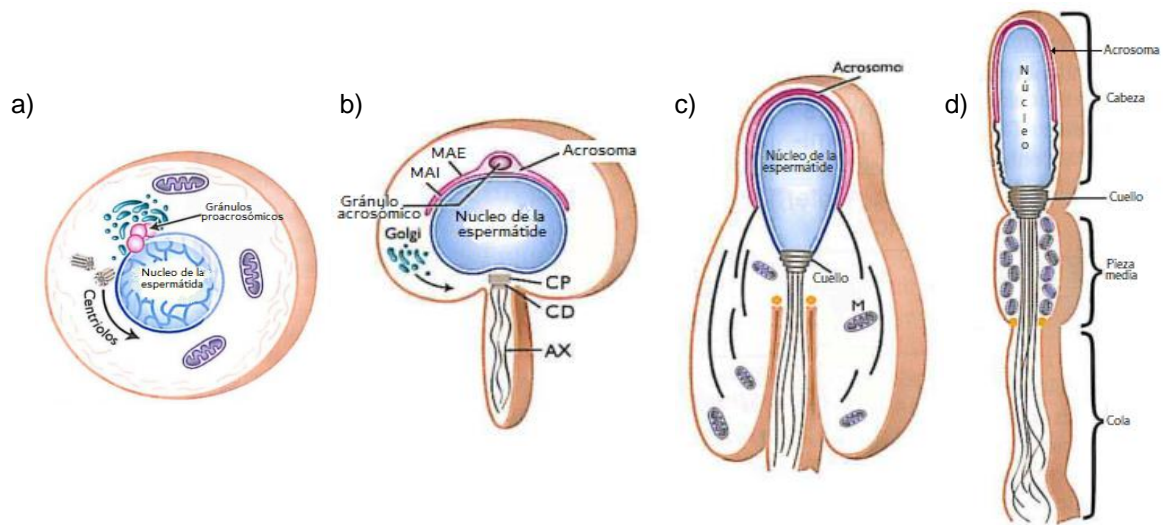


Figura 2. Fases de diferenciación de las espermátides: a) fase de Golgi, b) fase de capuchón, c) fase acrosómica, d) fase de maduración, espermatozoide maduro. MAE= membrana acrosomal externa; MAI= membrana acrosomal interna; CP= centriolo proximal; CD= centriolo distal; AX= axonema; M= mitocondria (obtenido de Senger, 2012).

Es importante aclarar que las células espermáticas están constantemente dividiéndose, por lo que en cualquier corte transversal que se realice a lo largo de un túbulo seminífero, se pueden observar células en diferentes fases de su espermatogénesis. Lo anterior permite que frecuentemente se estén liberando espermatozoides, por lo que se considera que la espermatogénesis es un proceso cíclico. En los ovinos, una espermatogonia A1 tarda aproximadamente de 45 a 47 días en atravesar todas las etapas de la espermatogénesis y convertirse en un espermatozoide maduro (Alves *et al.*, 2016).

2.2.3. Control endócrino

El sistema que hace posible la ciclicidad de la espermatogénesis es el eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG), que se estimula con la secreción hipotalámica de GnRH en ráfagas frecuentes e intermitentes que suceden día y noche de manera permanente (Singh y Gupta, 2019). Dichas secreciones pulsátiles de GnRH duran de 10 a 20 minutos y ocurren cada 2 a 6 horas; de manera subsecuente se generan

episodios de LH por parte de la adenohipófisis. La presencia de FSH se da de igual manera, estimulada por la GnRH, pero en menor concentración y con mayor permanencia (Senger, 2012).

En el intersticio de los testículos se encuentran las células de Leydig (órgano blanco de LH), las cuales se encargan de sintetizar y liberar testosterona (TES). Las células de Leydig, con ayuda de una enzima conocida como aromatasas, sintetizan y secretan estrógeno (E2) a partir de la TES (Sengupta *et al.*, 2019). Una vez sintetizados, la TES y el E2 ingresan a torrente sanguíneo y linfa, la TES se une a la proteína de unión a andrógenos (ABP) y viajan hasta el eje HHG para ejercer retroalimentación negativa y regular la liberación de GnRH y la secreción hipofisaria de FSH y LH. La TES tiene una función reguladora autócrina (en las mismas células de Leydig), endócrina a nivel del eje HHG, y parácrina sobre las células de Sertoli (Hafez y Hafez, 2013).

Las células de Sertoli en respuesta a la FSH y la TES, se encargan de regular la nutrición, diferenciación y transformación de las células germinales a espermatozoides (Alves *et al.*, 2016). Además de su participación en la espermatogénesis, la TES prolonga la vida de los espermatozoides en el epidídimo, promueve la actividad de las glándulas sexuales accesorias, y mantiene la libido y las características sexuales secundarias de los machos (Hafez y Hafez, 2013). Por su parte, las células de Sertoli también secretan 3 hormonas reguladoras del eje HHG sobre la producción de FSH: 1) inhibina, que llega por vía sanguínea directamente a adenohipófisis e inhibe la secreción de la FSH sin alterar la de LH, 2) activina, estimula la liberación de FSH, y 3) folistatina, que tiende a unirse con la activina y ralentizar la liberación de FSH (Sengupta *et al.*, 2019).

Dentro del panorama endocrino de los carneros, es importante mencionar que a esta especie se le considera estacional, es decir, su reproducción está influenciada por el fotoperíodo anual. Esto sucede porque la glándula pineal de los ovinos procesa las variaciones en las horas luz, lo que provoca que en los días más largos del año disminuya la síntesis y secreción de una hormona llamada melatonina, y en los días cortos ocurre lo contrario (Correa y Fernández, 2017). Los niveles de melatonina en

presencia de más horas luz, modifican las pulsaciones de GnRH, disminuyen la secreción de gonadotropinas, y por ende la síntesis de testosterona y producción espermática. La administración de melatonina exógena durante la temporada de anestro puede incrementar las características seminales y la circunferencia escrotal (Cadena-Villegas *et al.*, 2020).

Por otro lado, existen otras hormonas que se encuentran estrechamente relacionadas al eje HHG, dado que comparten al hipotálamo e hipófisis entre los órganos que las regulan. Tal es el caso de la hormona secretada por adenohipófisis llamada Prolactina (PRL), cuya supresión disminuye los niveles de testosterona debido a que entre sus funciones se encuentra el estimular los receptores de LH de las células de Leydig (Sengupta *et al.*, 2019; Casao *et al.*, 2010). Asimismo, son importantes las hormonas tiroideas (triyodotironina y tiroxina) reguladas por el eje hipotálamo-hipófisis-tiroides; dicha importancia radica en que comparte el centro de activación con el eje HHG. Aparentemente, las hormonas tiroideas inhiben gradualmente la FSH conforme se acerca la temporada de anestro (Zamiri y Khodaei, 2005).

También es importante mencionar que existen otras hormonas que no se producen específicamente en el eje HHG, pero también tienen un papel importante en el control endocrino en la reproducción, p. ej.:

- a) La insulina estimula las células de Sertoli para activar algunos mecanismos necesarios para la espermatogénesis como: la captación de elementos de nucleósidos libres, la secreción de transferrina, la síntesis de ADN y proteínas, el metabolismo de la glicina y la producción de lactato (Dias *et al.*, 2013). Además, se ha observado que la insulina a nivel de líquido cefalorraquídeo se correlaciona positivamente con la producción de LH (Blache *et al.*, 2006).
- b) El factor de crecimiento semejante a la insulina tipo I (IGF-I) participa en la maduración y desarrollo de las células germinales, por lo que se encuentra fuertemente relacionado con la buena motilidad espermática y fertilidad (Selvaraju *et al.*, 2012). Además, el incremento de su concentración en sangre podría incrementar la liberación de LH por parte del hipotálamo (Blache *et al.*, 2006).

- c) La leptina, además de participar en el inicio de la pubertad, en los carneros adultos se propone que forma parte de una serie de factores humorales y neurales que intervienen en el funcionamiento del eje reproductivo, y que su efecto es observado mayormente en términos de su influencia por periodos largos (Dias *et al.*, 2013).
- d) La adiponectina es otra hormona que participa en la regulación de secreción de GnRH, gonadotropinas, y su incremento puede reducir la producción de testosterona. Además, ayuda a modular cuestiones de esteroidogénesis, apoptosis celular y estrés oxidativo en las gónadas (Barbe *et al.*, 2019). Se ha relacionado positivamente su expresión con buena motilidad espermática en carneros (Rak *et al.*, 2017), y en la etapa de desarrollo se incrementa gradualmente conforme el carnero adquiere peso. Sin embargo, en la etapa adulta está inversamente relacionada con la grasa corporal, por lo que, se espera que en ovinos con mayor condición corporal se encuentre en concentraciones sanguíneas más bajas (English *et al.*, 2018).
- e) La resistina se encuentra altamente relacionada con problemas de obesidad, adipogénesis y resistencia a la insulina. Es producida por los adipocitos (Clarke *et al.*, 2014). Se sabe que en humanos se encuentra mayormente concentrada en el plasma seminal comparado con el suero sanguíneo, y está inversamente relacionada con la motilidad espermática. Sin embargo, los conocimientos sobre ella en machos ovinos aún son escasos (Rak *et al.*, 2017).
- f) La ghrelina es una hormona que regula el consumo de alimento, cuando hay necesidad de consumir alimento se secreta en mayor medida (English *et al.*, 2018). Además, está fuertemente relacionada con la supresión del eje HHG (Clarke *et al.*, 2014).

2.3. Actividad reproductiva del carnero de pelo

Como ya se mencionó anteriormente, el ovino de pelo se ha distribuido principalmente en zonas cálidas. Esto se debe a que se originaron en climas tropicales y sus características fenotípicas y genotípicas se fueron adaptando por generaciones, de modo que se volvieron animales muy rústicos (Aguilar-Martínez *et al.*, 2017). Su

capacidad reproductiva les permite cubrir desde 25 (sementales jóvenes) hasta 50 (sementales adultos) hembras durante la época de apareamiento. Esto es posible gracias a que su eyaculado presenta un bajo volumen (0.7 a 2.0 mL) con alta concentración ($2 - 5 \times 10^9$ espermatozoides/mL; Tibary *et al.*, 2018). Estos eyaculados se consideran de características satisfactorias mientras tengan una concentración $\geq 1.2 \times 10^9$ espermatozoides/mL, progresividad $\geq 60\%$, $\leq 20\%$ de anormalidades morfológicas, y presenten un volumen seminal ≥ 0.2 mL (Aké-López *et al.* 2017). Sin perder de vista que los sementales seleccionados para empadrear deben presentar buena salud, no exhiban anormalidades en su aparato reproductor externo, y su perímetro escrotal debe ser de 28 a 33 cm (Tibary *et al.*, 2018; Aké-López *et al.* 2017).

Un aspecto importante es que los carneros de pelo presentan baja estacionalidad, lo que les permite que sus características seminales y libido no disminuyan lo suficiente como para interrumpir su capacidad reproductiva durante el año (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2015; Malejane *et al.*, 2014). Asimismo, cuando se agrupan con las hembras durante el anestro estacional, tienen la capacidad para estimular el celo. Y se ha observado que su tiempo de reacción a primera monta se mantiene menor a un minuto (20 a 59 s) durante todo el año (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2015; Aguirre *et al.*, 2007). Sin embargo, el rendimiento sexual presenta diferencias dependiendo de la ubicación geográfica de los sementales, por lo que es importante dar seguimiento a cada rebaño de forma individual (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020).

Aunque la temperatura ambiental, la nutrición, y el comportamiento ejercen cierto efecto sobre dicha estacionalidad en el carnero, el período de horas luz es el que se ha identificado como el factor determinante. Es importante mencionar que, mientras se detiene la ovulación y el estro en la oveja, la espermatogénesis y la actividad sexual en el carnero nunca se detienen (Rosa y Bryant, 2003). Sin embargo, se han documentado efectos negativos en el volumen de eyaculado, concentración espermática y circunferencia escrotal (Csilla *et al.*, 2013; Aguirre *et al.*, 2007), así como incremento en las anormalidades espermáticas (Cadena-Villegas *et al.*, 2020). Asimismo, se ha observado que la llegada de la pubertad se retrasa en los sementales que tienen la edad apropiada, pero no se encuentran dentro de la época reproductiva

(Sánchez-Dávila *et al.*, 2019). Esta estacionalidad por fotoperiodo se presenta usualmente durante los meses de primavera e inicios de verano, ya que es la época en la que los carneros se encuentran en mayor exposición a horas luz (Csilla *et al.*, 2013; Martin *et al.*, 2002).

A pesar de las evidencias mencionadas, también se ha observado que la estacionalidad sobre los niveles séricos de testosterona en los carneros de pelo depende mayormente de la nutrición, especialmente en el caso de cruces con razas de lana (Zhang *et al.* 2005; Cárdenas-Gallegos *et al.* 2015) Recientemente se han realizado otras investigaciones que directamente atribuyen la estacionalidad del ovino de pelo a las condiciones climáticas y la disponibilidad del alimento, y aseguran que el fotoperiodo no afecta a estos sementales (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020; Malejane *et al.*, 2014). Ya que los meses en que se presentan lluvias muestran mayor apetito sexual y mejor calidad seminal debido a que el forraje se encuentra fresco y con mayor disponibilidad, lo que mejora la ingesta de nutrientes (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020). Esto ocasiona un efecto dinámico sobre la pulsatilidad de la LH y leptina, con la consecución de una liberación más constante de GnRH y, por lo tanto, mejorando la espermatogénesis (Sánchez *et al.*, 2012). Asimismo, la dominancia de un ovino de pelo puede ser una garantía para el consumo de alimento de mejor calidad, por lo que la posición en la jerarquía social de los sementales también es un factor asociado a mejor calidad seminal y conducta sexual (Sifuentes-Lamónt *et al.*, 2022).

Además de las lluvias, la temperatura es otro factor ambiental que afecta la calidad espermática de los carneros de pelo. Malejane *et al.* (2014) mencionan que la temperatura ambiental por debajo de los 10 °C puede afectar la calidad seminal; asimismo, se pueden afectar las características seminales por las altas temperaturas. Aunque los efectos negativos sobre la reproducción del carnero varían de acuerdo con el tipo de clima y el período de exposición al estrés por calor, se estima que los daños pueden comenzar desde los 25 a 31 °C (van Wettere *et al.*, 2021; Vicente-Pérez *et al.*, 2020).

2.4. Estrés calórico y actividad reproductiva del carnero de pelo en climas cálidos

Se estima que el ovino de pelo comienza a experimentar estrés por calor (EC) a partir de los 28 a 31 °C. A lo largo del tiempo, se han adaptado diferentes métodos para evaluar el nivel de EC en los ovinos. De igual forma, dichos métodos suelen utilizarse de forma simultánea para caracterizar el EC al que se someten los animales. Entre los más utilizados se encuentran:

- 1) Frecuencia respiratoria (FR): esta variable fisiológica incrementa con el fin de disminuir la carga de calor cuando el equilibrio homeostático se compromete por el aumento constante de la temperatura ambiental. Se estima que el ovino de pelo elimina de 60 a 90% de la carga de calor a través del tracto respiratorio (Vicente-Pérez *et al.*, 2020; Fonseca *et al.*, 2017).
- 2) Temperatura rectal: las temperaturas rectales ≥ 40.0 °C indican que el ovino de pelo presenta dificultades para mantener la homeostasis, lo que provoca un incremento de la temperatura corporal (McManus *et al.*, 2009, Marai *et al.*, 2007)
- 3) Índices: algunos se basan únicamente en variables climatológicas, como el índice de temperatura-humedad (ITH) y el Índice de humedad del globo negro (BGHI). Otros también integran variables fisiológicas, como los índices de tolerancia al calor (Seixas *et al.*, 2017). Los ITHs y el BGHI clasifican de moderado a extremadamente severo el EC al que están sometidos los ovinos, mientras que los índices de tolerancia relacionan la capacidad de los ovinos para disipar el calor. De los anteriores, el más utilizado es el ITH, y se estima que el ovino de pelo comienza a experimentar EC entre 78 a 82 unidades (Neves *et al.*, 2009; Marai *et al.*, 2007).
- 4) Termografía: técnica que detecta la radiación infrarroja emitida por el cuerpo del ovino mediante el uso de una cámara termográfica, y permite sondear el calor que pierde o gana el semental bajo un ambiente de EC (Tattersall, 2016). Lo anterior se logra observando la interacción entre la temperatura de diferentes superficies de pelaje del animal, entre sí o contra otras variables fisiológicas y ambientales. Por ejemplo, en los sementales de pelo, existe una correlación positiva del gradiente térmico entre los polos testiculares con la integridad de la

membrana espermática, así como una correlación negativa con los defectos espermáticos totales (Moura *et al.*, 2019).

- 5) Comportamiento: Los ovinos de pelo disminuyen su consumo de alimento (Sejian *et al.*, 2017) y su desplazamiento con el fin de generar una menor cantidad de calor metabólico (Marai *et al.*, 2007).
- 6) Otras variables: la frecuencia cardíaca, la tasa de sudoración, y la ingesta agua, incrementan en presencia del EC (Sejian *et al.*, 2017).

La respuesta al EC inicia en el sistema nervioso central por dos vías: 1) secreción de vasopresina (ADH) que produce la liberación de adrenalina y noradrenalina en la médula de las glándulas adrenales (Tort y Teles, 2011); y 2) activación del eje hipotálamo-hipófisis-adrenal que produce la liberación de cortisol en la corteza de las adrenales por estimulación de hormona adrenocorticotropa (ACTH; Damián *et al.*, 2015). El cortisol y la adrenalina incrementan la disponibilidad de energía por diferentes vías, no obstante, ejercen una retroalimentación negativa sobre el hipotálamo, lo que disminuye la secreción hipofisiaria de tirotropina (TSH) y gonadotropinas (LH y FSH). La FSH y la LH son las principales hormonas hipofisarias que regulan la producción de espermatozoides, por lo que el proceso se ve afectado cuando disminuyen los niveles séricos de dichas hormonas (Binsiya *et al.*, 2017).

La reducción de TSH restringe el metabolismo de azúcares y grasas. Estos nutrientes por su parte se encuentran proporcionando la energía requerida para reestablecer la homeostasis del organismo, por lo que disminuyen su participación en otras funciones orgánicas que no son vitales en ese momento (p.ej. espermatogénesis; Sejian *et al.*, 2017). En este sentido, se ha observado que en sementales de pelo bajo condiciones de EC, tanto la suplementación de nutrientes (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020), como el período de pastura abundante y de buena calidad (Carrascal-Triana *et al.*, 2022), mejoran el comportamiento sexual y la calidad espermática, respectivamente.

Además de lo mencionado, la espermatogénesis es un proceso muy sensible a las variaciones de temperatura, y se considera que la óptima en el testículo del macho ovino es de 2 a 8 °C por debajo de la corporal (Hamilton *et al.*, 2016). Por consiguiente,

los testículos cuentan propiamente con mecanismos de termorregulación que les permiten mantener constante la temperatura interna, sin embargo, esto los expone directamente al calor ambiental (Kahwage *et al.*, 2017). En este sentido, Mohamed *et al.* (2012) demostraron que la exposición directa a radiación solar afecta la termorregulación de los carneros, incrementa las anomalías espermáticas y disminuye la progresividad. Asimismo, proveer de sombra a los sementales de pelo bajo EC ha demostrado reducir la temperatura escrotal e incrementar la concentración espermática (Teodoro *et al.*, 2013). En la Figura 3, se ilustran las vías por las que el EC produce un efecto negativo en la reproducción del carnero.

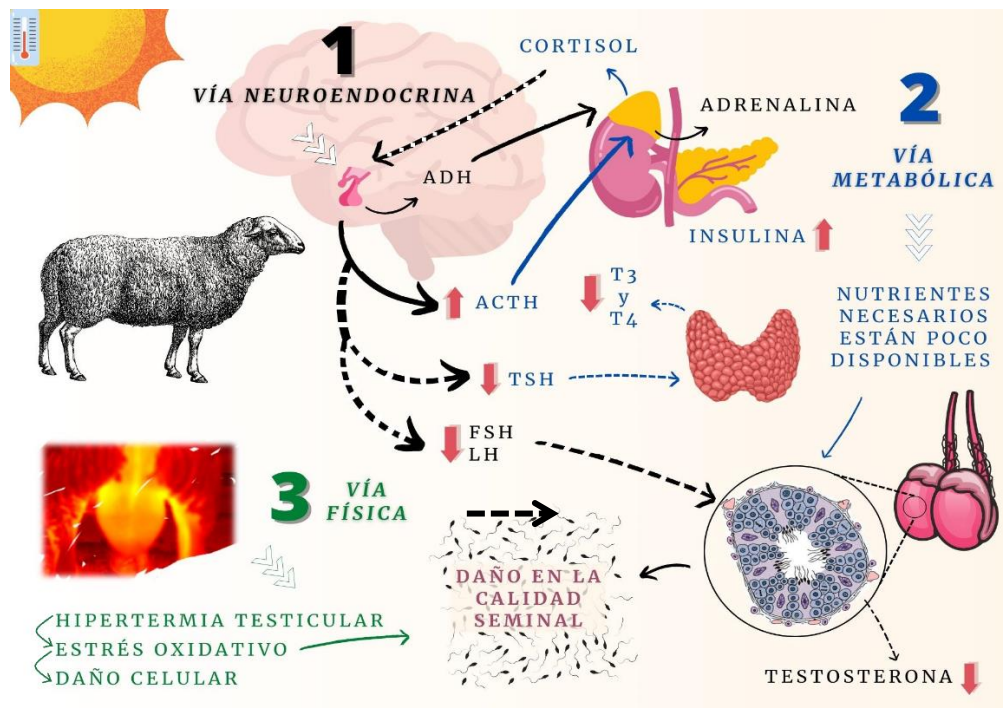


Figura 3. Vías de afectación de la calidad seminal en carneros de pelo sujetos a estrés por calor.

En sementales no adaptados al EC, se reduce la expresión de receptores de hormona LH en las células de Leydig a medida que incrementan las cantidades de cortisol en sangre (Huanca *et al.*, 2015). Por otro lado, De *et al.* (2017) proponen que los carneros de pelo presentan un mecanismo adaptativo bajo temperaturas elevadas,

el cual consiste en liberar LH, lo que a su vez conlleva a mejorar la producción de testosterona en las gónadas y, por lo tanto, se puede mantener el comportamiento sexual en dichas condiciones. El incremento de LH posterior a la hipertermia testicular se asocia a una respuesta del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal a causa de una deficiente retroalimentación de testosterona (Huanca *et al.*, 2015). En sementales de pelo se ha demostrado que conservan su capacidad reproductiva durante todo el año, lo que se atribuye a que la testosterona sérica permanece dentro del parámetro esperado (5 – 9 ng/mL), incluso en condiciones de EC (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020). Sin embargo, no existen estudios que evalúen las gonadotropinas séricas en carneros de pelo bajo condiciones de estrés por calor, por lo que se requiere más investigación con este enfoque.

A pesar de no tener confirmado el mecanismo de afectación del EC en la reproducción de los carneros de pelo, diversos autores han corroborado que se puede presentar una disminución en la motilidad espermática (Carrascal-Triana *et al.*, 2022; Simplicio *et al.*, 1982), en la concentración espermática (Teodoro *et al.*, 2013) y en la viabilidad espermática (Moura *et al.*, 2019); así como un incremento en las anomalías espermáticas (Mohamed *et al.*, 2012). Aunque en el sentido de la biometría testicular los resultados no han sido concluyentes, ya que algunos autores mencionan que por efectos del calor disminuye el volumen testicular, la circunferencia escrotal (Simplicio *et al.*, 1982; Moreira *et al.*, 2001), mantenerse el perímetro escrotal (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2019), o incluso incrementar (Teodoro *et al.*, 2013); disminución del perímetro de cordón espermático (Rodrigues *et al.*, 2023), y aumento de la longitud escrotal (Teodoro *et al.*, 2013). Es importante recordar que el EC afecta la reproducción de los sementales desde diferentes ángulos, por lo que dichos hallazgos se han atribuido a lo siguiente:

- a) Reducción del volumen testicular y la circunferencia escrotal: como se mencionó anteriormente, los testículos poseen un mecanismo de termorregulación que los posiciona a mayor distancia del cuerpo, lo que los expone mayormente a la radiación de calor (Mohamed *et al.*, 2012; Kahwage *et al.*, 2017). La hipertermia testicular provoca estrés oxidativo y fragmentación de ADN en las células somáticas y germinales; algunas de las células dañadas sufren de apoptosis, lo

que produce la disminución del parénquima testicular y pérdida de turgencia en los testículos. Cabe mencionar que el grado de daño depende de la duración de la exposición al EC y la temperatura (Moreira *et al.*, 2001; Hamilton *et al.*, 2016).

- b) Incremento del perímetro escrotal: algunos autores lo relacionaron con que ocurrieron lluvias importantes que aumentaron la disponibilidad y la calidad del pasto, creando una oportunidad para que los carneros tuvieran una mayor ingesta de nutrientes (Sánchez-Dávila *et al.*, 2020). Por otro lado, Teodoro *et al.* (2013) asociaron mayor circunferencia escrotal con una mayor actividad vascular en esta área. Recientemente se ha demostrado un incremento en la respuesta del flujo sanguíneo durante las horas de mayor exposición al calor (Rodrigues *et al.*, 2023). En este sentido, el aumento paulatino y constante del flujo sanguíneo se relaciona con mayores medidas y volumen testicular (Hedia *et al.*, 2019).
- c) Disminución del perímetro de cordón espermático y aumento de la longitud escrotal: ambos se relacionan a la capacidad de termorregulación propia de los testículos. Al momento en que se alejan de la cavidad abdominal se produce un estiramiento temporal de los vasos, lo que genera una disminución transitoria su calibre y una elongación de estos (van Wettere; Rodrigues *et al.*, 2023).

Independientemente de las diferentes opiniones entre autores, es un hecho que los sementales de pelo poseen gran capacidad de resiliencia a pesar del daño testicular y espermático por EC, ya que mantienen su actividad reproductiva y apetito sexual durante todo el año (Kahwage *et al.*, 2018; Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2015). Aunque es importante continuar indagando más a fondo en los mecanismos fisiológicos y metabólicos por los que tienen dicha capacidad.

2.5. Literatura citada

- Aguilar-Martínez, C. U., Berruecos-Villalobos, J. M., Espinoza-Gutiérrez, B., Segura-Correa, J. C., Valencia-Méndez, J., & Roldán-Roldán, A. (2017). Origen, historia y situación actual de la oveja Pelibuey en México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(3), 429-439. Available online at: <https://www.redalyc.org/pdf/939/93953814003.pdf>
- Aguirre, V., Orihuela, A., & Vazquez, R. (2007). Effect of semen collection frequency on seasonal variation in sexual behaviour, testosterone, testicular size and semen characteristics of tropical hair rams (*Ovis aries*). *Tropical Animal Health and Production*, 39(4), 271-277. <https://doi.org/10.1007/s11250-007-9010-8>
- Aké-López, J., Aké-Villanueva, N., Segura-Correa, J., Aké-Villanueva, J., & Montes-Pérez, R. (2016). Effect of age and season on semen traits and serving capacity of Pelibuey rams under tropical conditions. *Livestock Research for Rural Development*, 28(9), 166. Available online at: <http://www.lrrd.cipav.org.co/lrrd28/9/akel28166.htm>
- Alves, M. B., Andrade, A. F., Arruda, R. P., Batissaco, L., Florez-Rodriguez, S. A., Oliveira, B. M., Torres, M. A., Lanconi, R., Ravagnani, G. M., Prado Filho, R. R., Vellone, V. S., Losano, J. D., Franci, C. R., Nichi, M., & Celeghini, E. C. (2016). Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology*, 86(3), 795-805.e792. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2016.02.034>
- Anand-Ivell, R., Byrne, C. J., Arnecke, J., Fair, S., Lonergan, P., Kenny, D. A., & Ivell, R. (2019). Prepubertal nutrition alters Leydig cell functional capacity and timing of puberty. *PLOS ONE*, 14(11), e0225465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225465>
- Barbe, A., Bongrani, A., Mellouk, N., Estienne, A., Kurowska, P., Grandhaye, J., Elfassy, Y., Levy, R., Rak, A., & Froment, P. (2019). Mechanisms of adiponectin action in fertility: an overview from gametogenesis to gestation in humans and animal models in normal and pathological conditions. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(7), 1526. <https://doi.org/10.3390/ijms20071526>

- Bett, B., Kiunga, P., Gachohi, J., Sindato, C., Mbotha, D., Robinson, T., Lindahl, J., & Grace, D. (2017). Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Preventive Veterinary Medicine*, 137, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2016.11.019>
- Binsiya, T., Sejian, V., Bagath, M., Krishnan, G., Hyder, I., Manimaran, A., Lees, A., Gaughan, J., & Bhatta, R. (2017). Significance of hypothalamic-pituitary-adrenal axis to adapt to climate change in livestock. *International Journal for Research in Agricultural and Food Science*, 2(1), 1-20. Available online at: <http://www.prudentjournals.org/IRJAFS>
- Blache, D., Zhang, S., & Martin, G. B. (2006). Dynamic and integrative aspects of the regulation of reproduction by metabolic status in male sheep. *Reproduction Nutrition Development*, 46(4), 379-390. <https://doi.org/10.1051/rnd:2006019>
- Bobadilla-Soto, E. E., Ochoa-Ambriz, F., & Perea-Peña, M. (2021). Dinámica de la producción y consumo de carne ovina en México 1970 a 2019. *Agronomía Mesoamericana*, 32, 963-982. <https://doi.org/10.15517/am.v32i3.44473>
- Cadena-Villegas, S., Pérez-Hernández, P., Cortez-Romero, C., Vaquera-Huerta, H., & Gallegos-Sánchez, J. (2020). Calidad espermática en carneros de pelo durante el año a 19° latitud norte. *Agroproductividad*, 13, 37. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1582>
- Cárdenas-Gallegos, M., Aké-López, J., Magaña-Monforte, J., & Centurión-Castro, F. (2015). Libido and serving capacity of mature hair rams under tropical environmental conditions. *Archivos de medicina veterinaria*, 47(1), 39-44. Available online at: : <https://www.researchgate.net/publication/278244286>
- Carrascal-Triana, E. L., Romero, D. C. M., Perez, N. H., & Alvarez, J. J. C. (2022). Características seminales de ovinos bajo condiciones ambientales del Caribe Colombiano. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 33(4), e21611-e21611. <https://doi.org/10.15381/rivep.v33i4.21611>
- Casao, A., Cebrian, I., Asumpcao, M. E., Perez-Pe, R., Abecia, J. A., Forcada, F., Cebrian-Perez, J. A., & Muino-Blanco, T. (2010). Seasonal variations of melatonin in ram seminal plasma are correlated to those of testosterone and antioxidant

- enzymes. *Reproductive Biology and Endocrinology*, 8, 59. <https://doi.org/10.1186/1477-7827-8-59>.
- Clarke, I. J. (2014). Interface between metabolic balance and reproduction in ruminants: focus on the hypothalamus and pituitary. *Hormones and Behavior*, 66(1), 15-40. <https://doi.org/10.1016/j.yhbeh.2014.02.005>
- Correa, L. M., & Fernández, J. L. (2017). Influencia de la Melatonina sobre la fisiología y la conducta de ungulados. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19, 337-350.
- Costa, R., Jacinto, M., CAMACHO, M., MEDEIROS, A., Oliveira, R., & Rey, S. (2006). Aspectos estructurales de la piel ovina y su resistencia. Artículos técnicos. Argentina, Pág, 2, 24-29. <http://doi.org/10.18271/ria.2017.298>
- Casilla, B., János, O., István, E., András, J., & András, K. (2013). Seasonal variations in some reproductive parameters of Dorper Rams in Hungary. *Acta Agraria Debreceniensis*, 0(53), 17-20. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/53/2120>
- Damián, J. P., Bausero, M., & Bielli, A. (2015). Acute stress, hypothalamic-hypophyseal-gonadal axis and testicular function—A review. *Annals of Animal Science*, 15(1), 31-50. <http://doi.org/10.2478/aoas-2014-0084>
- De Ita, A. (2019). Las reformas agrarias neoliberales en México. *El cotidiano*, 34(214), 95-107. Available online at: <https://www.remamx.org/wp-content/uploads/2019/09/21409.pdf>
- De, K., Kumar, D., Balaganur, K., Kumar Saxena, V., Thirumurugan, P., & Khursheed Naqvi, S. M. (2017). Effect of thermal exposure on physiological adaptability and seminal attributes of rams under semi-arid environment. *Journal of Thermal Biology*, 65, 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.02.020>
- Dias, T. R., Martins, A. D., Reis, V. P., Socorro, S., Silva, B. M., Alves, M. G., & Oliveira, P. F. (2013). Glucose Transport and Metabolism in Sertoli Cell: Relevance for Male Fertility. *Current Chemical Biology*, 7(3), 282-293. Available online at: <https://www.ingentaconnect.com/content>
- Ebling, F. J. P. (2005). The neuroendocrine timing of puberty. *Reproduction*, 129(6), 675-683. <https://doi.org/10.1530/rep.1.00367>
- English, A. M., Kenny, D. A., Byrne, C. J., Sauerwein, H., Urh, C., Crowe, M. A., Staub, C., Waters, S. M., & Fair, S. (2018). Role of early life nutrition on regulating the

- hypothalamic–anterior pituitary–testicular axis of the bull. *Reproduction*, 156(4), 283. <https://doi.org/10.1530/rep-17-0671>
- FAOSTAT. (2022). *Producción: Cultivos y productos de ganadería*. Retrieved on December 25, 2022, from: <https://www.fao.org/faostat/es/#data>
- Fonseca, V. C., Saraiva, E. P., Maia, A. S. C., Nascimento, C. C. N., da Silva, J. A., Pereira, W. E., . . . Almeida, M. E. V. (2017). Models to predict both sensible and latent heat transfer in the respiratory tract of Morada Nova sheep under semiarid tropical environment. *International Journal of Biometeorology*, 61(5), 777-784. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1255-3>
- Gastelum-Delgado, M. A., Avendaño-Reyes, L., Álvarez-Valenzuela, F. D., Correa-Calderón, A., Meza-Herrera, C. A., Mellado, M., & Macías-Cruz, U. (2015). Conducta estral circanual en ovejas Pelibuey bajo condiciones áridas del noroeste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 6(1), 109-118. Available online at: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v6n1/v6n1a8.pdf>
- Hafez, E. S. E., & Hafez, B. (2013). *Reproduction in farm animals* (Seventh Edition). Pennsylvania, USA: Wiley-Blackwell.
- Hamilton, T. R., de Castro, L. S., Delgado Jde, C., de Assis, P. M., Siqueira, A. F., Mendes, C. M., . . . D'Avila Assumpcao, M. E. (2016). Induced lipid peroxidation in ram sperm: semen profile, DNA fragmentation and antioxidant status. *Reproduction*, 151(4), 379-390. <https://doi.org/10.1530/REP-15-0403>
- Hernandez, V. R., Vega Murillo, V., Costa, R. G., Parraguirre Lezama, C., Valencia de Ita, M. D. L. A., & Romero-Arenas, O. (2022). Evaluation of Genetic Parameters of Growth of Pelibuey and Blackbelly Sheep through Pedigree in Mexico. *Animals*, 12(6), 691. <https://doi.org/10.3390/ani12060691>
- Hernández-Marín, J. A., Valencia-Posadas, M., Ruíz-Nieto, J. E., Mireles-Arriaga, A. I., Cortez-Romero, C., & Gallegos-Sánchez, J. (2017). Contribution of sheep breeding to the livestock sector in Mexico. *Agroproductividad*, 10(3), 87-93. Available online at: <https://www.researchgate.net/publication/316460813>
- Hernández-Martínez, J., Ortiz-Rivera, M. I., Rebollar-Rebollar, S., Guzmán-Soria, E., & González-Razo, F. d. J. (2013). Comercialización de ovinos de pelo en los municipios de Tejupilco y Amatepec del Estado de México. *Agronomía*

- Mesoamericana*, 24, 195-201. Available online at: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v24n1/a18v24n1.pdf>
- Huanca, W., Coronado, L., & Galloway, D. B. (2015). Efecto de la manipulación de la temperatura escrotal sobre las características clínicas, seminales y endocrinas en carneros. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 26(4), 604-613. <http://doi.org/10.15381/rivep.v26i4.11217>
- INEGI. (2022). *Demografía y sociedad: población total*. Retrieved on December 25, 2022, from: <https://www.inegi.org.mx/temas/estructura/>
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: summary for policymakers*. Retrieved on December 26, 2022, from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- Kahwage, P. R., Esteves, S. N., Jacinto, M. A. C., Junior, W. B., Machado, R., Romanello, N., Passeri, L. F., de Mendonça, K. L., & Garcia, A. R. (2018). Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Ruminant Research*, 160, 72-80. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2018.01.015>
- Lue, Y. H., Hikim, A. P., Swerdloff, R. S., Im, P., Taing, K. S., Bui, T., Leung, A., & Wang, C. (1999). Single exposure to heat induces stage-specific germ cell apoptosis in rats: role of intratesticular testosterone on stage specificity. *Endocrinology*, 140(4), 1709-1717. <https://doi.org/10.1210/endo.140.4.6629>
- Macías-Cruz, U., Gastelum, M. A., Alvarez, F. D., Correa, A., Diaz, R., Meza-Herrera, C. A., Mellado, M., & Avendano-Reyes, L. (2016). Effects of summer heat stress on physiological variables, ovulation and progesterone secretion in Pelibuey ewes under natural outdoor conditions in an arid region. *Animal Science Journal*, 87(3), 354-360. <https://doi.org/10.1111/asj.12430>
- Macías-Cruz, U., Sánchez-Estrada, T., Gastelum-Delgado, M., Avendaño-Reyes, L., Correa-Calderón, A., Álvarez-Valenzuela, F., Díaz-Molina, R., Meza-Herrera, C., & Mellado, M. (2015). Seasonal reproductive activity of Pelibuey ewes under arid conditions of Mexico. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 47(3), 381-386. <http://doi.org/10.4067/S0301-732X2015000300016>

- Mäkelä, J.-A., & Hobbs, R. M. (2019). Molecular regulation of spermatogonial stem cell renewal and differentiation. *Reproduction*, 158(5), R169-R187. <http://doi.org/10.1530/rep-18-0476>
- Malejane, C. M., Greyling, J., & Raito, M. (2014). Seasonal variation in semen quality of Dorper rams using different collection techniques. *South African Journal of Animal Science*, 44(1), 26-32. <http://doi.org/10.4314/sajas.v44i1.4>
- Marai, I. F. M., El-Darawany, A. A., Fadiel, A., & Abdel-Hafez, M. A. M. (2007). Physiological traits as affected by heat stress in sheep — A review. *Small Ruminant Research*, 71(1), 1-12. <http://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2006.10.003>
- Martin, G. B., Hötzel, M. J., Blache, D., Walkden-Brown, S. W., Blackberry, M. A., Boukhliq, R., Fisher, J. S., & Miller, D. W. (2002). Determinants of the annual pattern of reproduction in mature male Merino and Suffolk sheep: modification of responses to photoperiod by an annual cycle in food supply. *Reproduction, Fertility and Development*, 14(3), 165-175. <https://doi.org/10.1071/RD02010>
- Martinez, J., Dominguez, B., Barrientos, M., Canseco, R., Ortega, E., & Lamothe, C. (2012). Biometry and testicular growth influenced by nutrition on prepubertal pelibuey lambs. *Online Journal of Animal and Feed Research*, 2, 314-321. Available online at: <http://www.ojafr.ir/main/attachments/article/87/OJAFR,%20B59,%20314-321,%202012.pdf>
- McManus, C., Paludo, G. R., Louvandini, H., Gugel, R., Sasaki, L. C., & Paiva, S. R. (2009). Heat tolerance in Brazilian sheep: physiological and blood parameters. *Tropical Animal Health and Production*, 41(1), 95-101. <https://doi.org/10.1007/s11250-008-9162-1>
- McManus, C. M., Faria, D. A., Lucci, C. M., Louvandini, H., Pereira, S. A., & Paiva, S. R. (2020). Heat stress effects on sheep: Are hair sheep more heat resistant? *Theriogenology*. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.05.047>
- Mohamed, S. S., Abdelatif, A. M., & Adam, A. A. G. (2012). Effects of exposure to solar radiation on thermoregulation and semen characteristics of Sudanese desert rams (*Ovis aries*). *Global Veterinaria*, 9(4), 502-507. <https://doi.org/10.5829/idosi.gv.2012.9.4.65180>

- Moreira, E. P., Moura, A. d. A. A., & Araújo, A. A. d. (2001). Efeitos da insulação escrotal sobre a biometria testicular e parâmetros seminais em carneiros da raça Santa Inês criados no estado do Ceará. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 30(6), 1704-1711. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982001000700007>
- Moura, A. B. B., Brandao, F. Z., Esteves, S. N., de Souza, G. N., da Fonseca, J. F., Pantoja, M. H. A., Romanello, N., Botta, D., Giro, A., & Garcia, A. R. (2019). Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology*, 123, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.09.037>
- Neves, M. L. M. W., de Azevedo, M., da Costa, L. A. B., Guim, A., Leite, A. M., & Chagas, J. C. (2009). Níveis críticos do Índice de Conforto Térmico para ovinos da raça Santa Inês criados a pasto no agreste do Estado de Pernambuco. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 31(2), 169-175. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v31i2.3766>
- Partida de la Peña, J. A., Ríos Rincón, F. G., Cruz Colín, L. d. I., Domínguez Vara, I. A., & Buendía Rodríguez, G. (2017). Caracterización de las canales ovinas producidas en México. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 8(3), 269-277. <http://doi.org/10.22319/rmcp.v8i3.4203>
- Rak, A., Mellouk, N., Froment, P., & Dupont, J. (2017). Adiponectin and resistin: potential metabolic signals affecting hypothalamo-pituitary gonadal axis in females and males of different species. *Reproduction*, 153(6), R215-R226. <https://doi.org/10.1530/rep-17-0002>
- Rodrigues, A. M. B. (2014). *Tratamento da degeneração testicular em carneiros com suplementação de vitamina A ou laserterapia de baixa intensidade*. Tesis de maestría. Universidade de São Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.11606/D.10.2014.tde-18092014-112108>
- Rodrigues, J. N. D., Guimarães, J. D., Fonseca, J. F., Penitente-Filho, J. M., Rangel, P. S. C., López, C. J. R., Freitas, R. S., Castilho, E. F. d., Rodrigues, L. F. d. S., Oliveira, M. E. F., & Garcia, A. R. (2023). Climatic seasons and time of the day influence thermoregulation and testicular hemodynamics in Santa Inês rams raised

- under humid tropical conditions. *Journal of Thermal Biology*, 114, 103546. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103546>
- Romero, M. J. (2012). *UNIDAD 4. Zootecnia de ovinos. Introducción a la zootecnia*. México: UNAM. Available online at: https://fmvz.unam.mx/fmvz/p_estudios/apuntes_zoo/unidad_4_ovinos.pdf
- Rosa, H. J. D., & Bryant, M. J. (2003). Seasonality of reproduction in sheep. *Small Ruminant Research*, 48(3), 155-171. [https://doi.org/10.1016/S0921-4488\(03\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0921-4488(03)00038-5)
- Rosales Nieto, C. A., Ferguson, M. B., Briegel, J. R., Hedger, M. P., Martin, G. B., & Thompson, A. N. (2019). Pre-pubertal growth, muscle and fat accumulation in male and female sheep—Relationships with metabolic hormone concentrations, timing of puberty and reproductive outcomes. *Reproduction in Domestic Animals*, 54(12), 1596-1603. <https://doi.org/10.1111/rda.13568>
- Sánchez, F., Ledezma, R. A., González, A., & Rivas, G. P. (2012). Caracterización reproductiva de machos Saint Croix I: variación estacional en la calidad seminal en carneros de pelo, mantenidos bajo pastoreo extensivo en potreros de zacate buffel (*Cenchrus ciliaris*). In *VII Cátedra CUMEX, Aline Schunemann*, pp. 31–35 Available online at: https://handbook.usfx.bo/nueva/vicerrectorado/citas/SALUD_10/Nutricion_y_Dietetica/90.pdf#page=31
- Sanchez-Davila, F., Bernal-Barragan, H., Vazquez-Armijo, J. F., López-Villalobos, N., Ledezma-Torres, R. A., Grizelj, J., Brenner, E. G., Vasquez, N. A., & Palomera, C. L. (2020). Annual variation in reproductive parameters and sexual behaviour of Saint Croix rams in a semi-desert region in Mexico. *Journal of Applied Animal Research*, 48(1), 499-506. <https://doi.org/10.1080/09712119.2020.1830778>
- Santos, S. I., Sánchez-Dávila, F., Vázquez-Armijo, J. F., Ledezma-Torres, R. A., del Bosque-González, A. S., Palomera, C. L., & Bernal-Barragán, H. (2015). Changes in sexual behaviour and semen quality associated with age and type of enclosure of Saint Croix rams in different seasons of the year. *Italian Journal of Animal Science*, 14(4), 3890. <https://doi.org/10.4081/ijas.2015.3890>

- Seixas, L., de Melo, C. B., Tanure, C. B., Peripolli, V., & McManus, C. (2017). Heat tolerance in Brazilian hair sheep. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(4), 593-601. <https://doi.org/10.5713/ajas.16.0191>
- Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J., Malik, P. K., Naqvi, S., & Lal, R. (2017). *Sheep production adapting to climate change* (First Edition). Singapore: Springer.
- Sejian, V., Bhatta, R., Gaughan, J. B., Dunshea, F. R., & Lacetera, N. (2018). Review: Adaptation of animals to heat stress. *Animal*, 12(s2), s431-s444. <https://doi.org/10.1017/S1751731118001945>
- Selvaraju, S., Sivasubramani, T., Raghavendra, B. S., Raju, P., Rao, S. B. N., Dineshkumar, D., & Ravindra, J. P. (2012). Effect of dietary energy on seminal plasma insulin-like growth factor-I (IGF-I), serum IGF-I and testosterone levels, semen quality and fertility in adult rams. *Theriogenology*, 78(3), 646-655. doi: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.03.010>
- SEMARNAT. (2015). *Atlas Digital Geográfico: Atmósfera: Climas*. Retrieved on January 4, 2023, from: http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html
- Senger, P. L. (2012). Endocrinology of the men & spermatogenesis. In *Pathways to pregnancy and parturition* (pp. 201–227). Pullman, Washington: Current conceptions, Inc.
- Sengupta, P., Arafa, M., Elbardisi, H. (2019). Hormonal regulation of spermatogenesis. In *Molecular Signaling in Spermatogenesis and Male Infertility* (pp. 41–49). India: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429244216-5>
- SIAP. (2021). *Población ganadera: Inventario 2021 Ovino*. Retrieved on August 24, 2022, from: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/744954/Inventario_2021_ovino.pdf
- Sifuentes-Lamónt, P. I., Meza-Herrera, C. A., Véliz-Deras, F. G., Alvarado-Espino, A. S., Alvarado-Espino, A. V., Calderón-Leyva, G., Delgado González, R. A. (2022). Multifaceted Interplay among Social Dominance, Body Condition, Appetitive and Consummatory Sexual Behaviors, and Semen Quality in Dorper Rams during Out-

- Of-Season and Transition Periods. *Animals*, 12(23), 3339. <https://doi.org/10.3390/ani12233339>
- Simplicio, A. A., Riera, G. S., Nelson, E. A., & Pant, K. P. (1982). Seasonal variation in seminal and testicular characteristics of Brazilian Somali rams in the hot semi-arid climate of tropical northeast Brazil. *Journal of Reproduction & Infertility*, 66(2), 735-738. <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0660735>
- Singh, B., & Gupta, G. (2019). Testicular germ cell apoptosis and spermatogenesis. In *Molecular Signaling in Spermatogenesis and Male Infertility* (pp. 31-40). India: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429244216-4>
- Souza, C. E., Araujo, A. A., Oliveira, J. T., Lima Souza, A. C., Neiva, J. N., & Moura, A. A. (2010). Reproductive development of Santa Ines rams during the first year of life: body and testis growth, testosterone concentrations, sperm parameters, age at puberty and seminal plasma proteins. *Reproduction in Domestic Animals*, 45(4), 644-653. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01322.x>.
- Staub, C., & Johnson, L. (2018). Review: Spermatogenesis in the bull. *Animal*, 12(s1), s27-s35. <https://doi.org/10.1017/S1751731118000435>.
- Tattersall, G. J. (2016). Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 202, 78-98. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2016.02.022>.
- Teodoro, S. M., Pereira, A. M. F., Gusmão Filho, J. D., & Silva, J. N. d. (2013). Influence of availability of shade on testicular characteristics of Santa Ines rams. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 35(4), 441-446. <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v35i.18479>
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., & Herrero, M. (2021). Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology*, 27(22), 5762-5772. <https://doi.org/10.1111/gcb.15825>.
- Tibary, A., Boukhliq, R., & El Allali, K. (2018). Ram and buck breeding soundness examination. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, 6(2), 241-255. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/340117407>
- Tichenor, N. E., Peters, C. J., Norris, G. A., Thoma, G., & Griffin, T. S. (2017). Life cycle environmental consequences of grass-fed and dairy beef production systems in

- the Northeastern United States. *Journal of cleaner production*, 142, 1619-1628.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.138>
- Tort, L., & Teles, M. (2011). The endocrine response to stress-a comparative view. In *Basic and clinical endocrinology Up-to-Date* (pp. 263–286). Croatia: InTech.
- van Wettere, W. H. E. J., Kind, K. L., Gatford, K. L., Swinbourne, A. M., Leu, S. T., Hayman, P. T., Kelly, J. M., Weaver, A. C., Kleemann, D. O., & Walker, S. K. (2021). Review of the impact of heat stress on reproductive performance of sheep. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 12(1), 26.
<https://doi.org/10.1186/s40104-020-00537-z>.
- Vicente-Pérez, R., Macías-Cruz, U., Avendaño-Reyes, L., Correa-Calderón, A., López-Baca, M. A., & Lara-Rivera, A. L. (2020). Impacto del estrés por calor en la producción de ovinos de pelo. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 11(1), 205-222. <https://doi.org/10.22319/rmcp.v11i1.4923>
- Zamiri, M. J., & Khodaei, H. R. (2005). Seasonal thyroidal activity and reproductive characteristics of Iranian fat-tailed rams. *Animal Reproduction Science*, 88(3-4), 245-255. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2004.12.005>.
- Zhang, S., Blache, D., Blackberry, M. A., & Martin, G. B. (2005). Body reserves affect the reproductive endocrine responses to an acute change in nutrition in mature male sheep. *Animal Reproduction Science*, 88(3-4), 257-269.
<https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2005.01.001>.

CAPÍTULO III. ARTÍCULOS

3.1. Termorregulación y respuestas reproductivas de carneros bajo estrés calórico. Revisión

Alejandra Barragán Sierra¹, Leonel Avendaño-Reyes¹, Juan A. Hernández Rivera², Ricardo Vicente-Pérez³, Abelardo Correa-Calderón¹, Miguel Mellado⁴, Cesar A. Meza-Herrera⁵, Ulises Macías-Cruz^{1*}

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas, Valle de Mexicali, Baja California, 21705, México.

²Universidad de Colima, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Tecomán, Colima, 28930, México.

³Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa Sur, Departamento de Producción Agrícola, Autlán de Navarro, Jalisco, 48900, México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo, URUZA, Bermejillo, Durango, 35230, México.

⁵Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Nutrición Animal, Saltillo, Coahuila, 25315, México.

*Autor de correspondencia: umacias@uabc.edu.mx

Publicado el 14 de marzo de 2022

***Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 12(3), 910-931**

Factor de impacto JCR: 0.863

Q3 de acuerdo al Scimago Journal Rank

<https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5624>

3.1.1. Resumen

Las temperaturas elevadas registradas durante la época de verano en las regiones cálidas comprometen la capacidad reproductiva de los animales domésticos. En carneros, el estrés por calor (EC) causa en el organismo una serie de ajustes fisiológicos, metabólicos, endocrinos y moleculares con el objeto de mantener normotermia y sobrevivir; sin embargo, varios de estos cambios se asocian negativamente con su fertilidad, principalmente los endocrinos. El EC en carneros provoca una disminución en las concentraciones sanguíneas de testosterona a través de diferentes mecanismos, y esto se refleja negativamente en el proceso de espermatogénesis y en la conducta sexual. En consecuencia, los carneros estresados por calor presentan baja calidad seminal y apetito sexual; a nivel de espermatozoides se ha observado daño estructural y en el ADN. Dada esta situación, se recomienda el uso de estrategias de mitigación del EC durante el verano en las explotaciones ovinas de regiones cálidas, tales como el uso de sombras en corrales, la administración de antioxidantes o modificaciones en la alimentación. Por lo tanto, el objetivo de este documento es revisar el conocimiento actual en relación al efecto del EC sobre la capacidad de termorregulación y reproductiva de los carneros, así como la aplicación de estrategias para su mitigación.

Palabras clave: Semental, Macho ovino, Apetito sexual, Calidad seminal, Daño espermático.

3.1.2. Abstract

The high temperatures recorded during the summer season in hot regions compromise the reproductive capacity of domestic animals. In rams, heat stress (HS) causes in the body a series of physiological, metabolic, endocrine, and molecular adjustments in order to maintain normothermia and survive; however, several of these changes are negatively associated with their fertility, mainly endocrine ones. HS in rams causes a decrease in blood testosterone concentrations through different mechanisms, and this is negatively reflected on the process of spermatogenesis and sexual behavior. Consequently, heat-stressed rams exhibit low seminal quality and libido; at the sperm level, structural and DNA damage has been observed. Given this

situation, the use of HS mitigation strategies during the summer in sheep farms in hot regions is recommended, such as the use of shades in pens, administration of antioxidants or modifications in the diet. Therefore, the objective of this document is to review the current knowledge regarding the effect of HS on the thermoregulation and reproductive capacity of rams, as well as the application of strategies for its mitigation.

Key words: Ram, Male sheep, Libido, Seminal quality, Sperm damage.

3.1.3. Introducción

Las regiones con climas calientes se caracterizan por presentar temperaturas ambientales (T_a) y humedades relativas (HR) elevadas en verano, que generalmente sobrepasan el límite superior de la zona termoneutral de los animales de producción ($\leq 30\text{ }^\circ\text{C}$), ocasionándoles la presencia de condiciones ambientales de estrés por calor (EC) ^(1,2). El impacto productivo y reproductivo que genera el EC en los animales varía entre especies, siendo los pequeños rumiantes quienes mejor adaptación muestran a estas condiciones ambientales ⁽³⁾. Algunas revisiones han descrito los mecanismos de termorregulación empleados por los ovinos para evitar hipertermia bajo EC ^(1,2,4,5), pero poca atención se pone respecto al efecto que tiene en la reproducción del carnero. En climas cálidos, el éxito reproductivo del rebaño depende en gran medida de la adaptación y el correcto funcionamiento reproductivo de los sementales.

El organismo de los carneros estresados por calor presenta una serie de cambios para evitar hipertermia ^(1,6-8). Así, la capacidad reproductiva de los carneros disminuye mientras hacen esfuerzos fisiológicos, metabólicos y endocrinológicos para mantenerse en normotermia ^(3,7,9-11). El EC puede afectar negativamente la reproducción del carnero por diferentes mecanismos, siendo los principales: 1) disminución en las concentraciones de testosterona, y 2) daño directo en la morfometría y contenido de material genético del espermatozoide ^(12,13). Esto se refleja en fallas en el proceso de espermatogénesis, así como en baja calidad seminal, conducta reproductiva y fertilidad ^(7,14-16). No obstante, la aplicación de estrategias de mitigación del EC mejora la capacidad reproductiva del carnero en estas condiciones climáticas ^(1,8,17).

Cabe mencionar que los resultados de los efectos de EC en la reproducción del carnero no son consistentes a través de los estudios. Diferencias entre razas a nivel de adaptación a EC explican en gran medida estas discrepancias ⁽³⁾. Por lo tanto, la presente revisión tiene como objetivo describir el conocimiento actual en relación al efecto del EC en la capacidad de termorregulación y reproductiva de los carneros, así como la aplicación de estrategias para su mitigación.

3.1.4. Ovinos en climas cálidos

En las últimas décadas, la acumulación excesiva de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera esta provocado un aumento en la Ta de la superficie terrestre ⁽¹⁾, por lo cual el cambio climático a nivel mundial es eminente, principalmente con tendencias a promover una mayor presencia de climas cálidos y, consecuentemente, la desertificación de más regiones del globo terrestre ⁽¹¹⁾. Las condiciones ambientales donde predominan Ta elevadas causan que los ovinos, así como cualquier otro animal de producción, experimenten EC ⁽²⁾, lo que representa para el organismo un desafío fisiológico-metabólico para mantenerse en condiciones de homeotermia ⁽⁶⁾.

En la búsqueda de estrategias que ayuden a mantener la producción de alimentos de origen animal bajo este escenario climático adverso, algunos autores proponen la producción de ovinos como una alternativa ^(1,10,18), principalmente debido a que son capaces de mantener su desempeño productivo bajo condiciones de EC ⁽³⁾. Entre las características de adaptabilidad que poseen los ovinos se incluyen resistencia a parásitos, enfermedades y escasez de agua para consumo ^(15,19); también capacidad para aprovechar forrajes y esquilmos agrícolas de mala calidad, y el mantenimiento de la capacidad reproductiva del rebaño y el crecimiento de los corderos bajo escenarios de EC ^(1,3,5). Cabe mencionar que el nivel de adaptación de los ovinos varía ampliamente entre razas, ya que existe una gran diversidad de ellas que fueron desarrolladas desde condiciones climáticas de frío hasta cálidas.

3.1.5. Estrés por calor y la producción ovina

El estrés se genera por la presencia de un evento externo que causa alteraciones en un sistema biológico ⁽²⁰⁾. En animales de producción se considera que hay estrés cuando algún factor externo altera su salud, metabolismo basal y capacidad productiva ⁽³⁾. En este sentido, los ovinos pueden desarrollar signos de estrés por enfrentarse a cambios drásticos en las condiciones climáticas, y de hecho, desarrollan EC cuando la combinación de factores ambientales provocan un incremento en la Ta por arriba del límite superior de su zona termoneutral ⁽¹⁾.

Las variables climáticas que pueden promover el ambiente de EC son Ta, HR, radiación solar, velocidad del viento y precipitación; no obstante, la Ta y la HR son los principales factores asociados con la presencia de EC ⁽⁵⁾, y en consecuencia, ambos son usados para construir el índice de temperatura-humedad ($ITH = Ta - [(0.31 - 0.31 \cdot HR) (Ta - 14.4)]$) ⁽⁴⁾. Cabe aclarar que este índice no se desarrolló para ovinos, sin embargo, en la actualidad es ampliamente usado para definir el grado de EC en esta especie, ya que a la fecha no existe uno específico para ellos. Basado en ese ITH, se considera que los ovinos comienzan a experimentar EC a las 22.2 unidades, siendo de tipo moderado entre 22.2 y <23.3 unidades, severo entre 23.3 y <25.6 unidades, y severo extremo a ≥ 25.6 unidades ⁽⁴⁾.

La zona termoneutral para la mayoría de las razas ovinas se encuentra entre los 5 y 25 °C ⁽¹⁾, sin embargo, hay razas adaptadas que comienzan a experimentar EC por encima de los 30 °C ^(5,15). Esto sugiere que, a pesar de ser homeotermos, la tolerancia de los ovinos al EC varía ampliamente entre razas, y estudios específicos para cada raza deben realizarse para evaluar su tolerancia a Ta altas. En el mundo, existen más de 1,000 razas de ovinos, las cuales varían en su capacidad de termorregulación en ambientes de hipertermia, y esto obedece a su origen climático ⁽³⁾. En México, se cuenta tanto con razas de lana y de pelo, pero estas últimas son más tolerantes al EC, dado que se originaron en climas cálidos, mientras que las de lana se originaron en climas fríos o templados ⁽⁵⁾. Esto no significa que no haya razas de lana tolerantes al EC en otros países; en Australia, la raza Merino muestra gran capacidad de adaptación a regiones cálidas ⁽¹⁾.

La respuesta termorregulatoria de los ovinos al EC también varía con el sexo, y dentro del sexo con la edad, estado fisiológico y actividad reproductiva ^(5,21). Mientras que los efectos negativos de EC son más notorios en crías y ovejas gestantes y lactando ^(21,22), en carneros parecen ser menos perceptibles ya que su producción de calor metabólico es bajo comparado con las ovejas, y más cuando se encuentran en descanso reproductivo ⁽¹⁾. Esto último podría ser la causa de que la mayoría de los estudios se desarrollen en ovejas, y consideren poco relevante el tema para investigar en carneros. No obstante, los procesos reproductivos testiculares son muy sensibles a cambios en la Ta, lo cual se asocia con baja fertilidad en los carneros en épocas cálidas. En este sentido, el resto de la revisión de literatura se centrará en analizar los efectos del EC en la reproducción del carnero.

3.1.6. Estrés por calor y termorregulación del carnero

La termorregulación de los carneros bajo condiciones termoneutrales se da esencialmente por la activación de mecanismos no evaporativos, sin que esto implique alteraciones metabólicas, endocrinas o en el requerimiento extra de energía de mantenimiento ^(1,3). Sin embargo, en condiciones de EC, los carneros activan una serie de mecanismos de termorregulación que favorecen la homeotermia frente al desafío térmico.

El EC en regiones cálidas aumenta los valores promedio de las variables fisiológicas, tales como temperatura rectal (TR), frecuencia respiratoria (FR), frecuencia cardíaca y tasa de sudoración (Cuadro 1) ^(10,18,23). Así, los carneros mantienen su normotermia, aunque resulta importante señalar que el aumento en el número de respiraciones es el principal mecanismo usado por los carneros para perder la carga de calor corporal ⁽²¹⁾. De hecho, los ovinos bajo EC pueden eliminar entre 60 y 90 % de la carga térmica a través del aparato respiratorio ⁽⁴⁾. Otro mecanismo fisiológico activado, el cual es más evidente en carneros de raza de pelo sujetos a EC, es la redistribución del flujo sanguíneo hacia tejidos periféricos para disipar el calor corporal por radiación a través de la piel ^(5,15). Conforme el gradiente de temperaturas entre la piel y el ambiente disminuye, la FR incrementa hasta convertirse en la principal vía de disipación de calor corporal ⁽²⁴⁾.

En carneros, el escroto funciona como un órgano de termorregulación tanto en condiciones termoneutrales como de EC ⁽¹⁾. En condiciones ambientales cálidas de verano, el escroto es una de las regiones corporales que más disipa carga de calor debido a la gran vascularización (plexo pampiniforme) que hay en la superficie testicular, y a la gran cantidad de glándulas sudoríparas ^(15,16). Existe una alta correlación entre la temperatura interna corporal y la temperatura escrotal, por lo que conocer la variabilidad de la temperatura escrotal permite evaluar la eficiencia de termorregulación del carnero ⁽¹⁵⁾.

La activación de los mecanismos evaporativos demanda una gran cantidad de agua corporal, por lo que el consumo de agua puede aumentar entre 19 y 25 % en los carneros durante el verano ⁽²⁵⁾. Esto trae como consecuencia que el consumo de alimento se reduzca por un efecto sustitutivo ⁽²⁶⁾. Sin embargo, en ovinos de pelo se demostró que el consumo de alimento se mantuvo similar en verano y primavera, independientemente del aumento en el consumo de agua registrado durante verano ⁽⁵⁾. Esto sugiere que el efecto sustitutivo del consumo de agua por consumo de alimento se presenta principalmente en carneros con menos tolerancia al EC. Así, la reducción en el consumo de alimento es el resultado del esfuerzo del carnero para reducir la producción de calor endógeno, al suprimir parcialmente la actividad metabólica y ruminal ^(1,4,27).

Todos los ajustes fisiológicos que presentan los carneros producto del EC causan un aumento en los requerimientos de energía de mantenimiento, mientras que la reducción en el consumo de alimento altera la disponibilidad de la misma ⁽⁵⁾. En consecuencia, las Ta altas de verano alteran el metabolismo de los carneros, en primera instancia para distribuir energía a los procesos de termorregulación, y en segunda para reducir la producción de calor endógeno, al mismo tiempo que hacen más eficiente el uso de los sustratos energéticos ^(28,29). No obstante, los resultados del efecto del EC en las concentraciones séricas de metabolitos y hormonas metabólicas no son consistentes entre los estudios (Cuadro 2).

La elevada FR observada en carneros estresados por calor, demanda una excesiva cantidad de glucosa como fuente de energía para el funcionamiento de los músculos del aparato respiratorio ⁽³⁾. Por consiguiente, los carneros en verano

incrementan las concentraciones sanguíneas de glucosa comparado con épocas termoneutrales, lo cual se debe a que las concentraciones de cortisol también aumentan en respuesta al EC ^(1,3). El cortisol promueve la gluconeogénesis y glucólisis hepática ⁽²⁸⁾. De acuerdo con esto, carneros de raza Ossimi ⁽³⁰⁾ y Najdi ⁽³¹⁾ registraron mayores concentraciones sanguíneas de cortisol y glucosa en verano que en invierno. Sin embargo, hay estudios donde las concentraciones séricas de glucosa disminuyeron ^(18,32) o no cambiaron ^(10,23) por efecto del EC en carneros. Esto podría estar asociado con un aumento en las concentraciones de insulina plasmática ⁽²⁸⁾.

En los ovinos expuestos a condiciones de EC crónico, principalmente los de razas adaptadas a climas cálidos, aumentan las concentraciones sanguíneas de insulina como un mecanismo adaptativo para mantener un correcto funcionamiento metabólico, mejorar la eficiencia en el uso de energía y reducir el catabolismo de tejido graso ^(28,29). Particularmente, los niveles altos de insulina permiten a los carneros estresados por calor: 1) evitar la apoptosis de las células β pancreáticas por un aumento en la producción de ácidos grasos no esterificados; 2) promover el consumo celular de glucosa circulante para su metabolismo; y 3) mantener anabolismo y evitar catabolismo, principalmente de tejido graso ^(3,28). Este último punto ha sido asociado con la disminución en las concentraciones séricas de triglicéridos, colesterol y lípidos totales en carneros sometidos a EC crónico ^(18,30). Adicionalmente, una reducción en las concentraciones sanguíneas de dichos metabolitos lipídicos, está asociada parcialmente con la movilización de ácidos grasos para cubrir los requerimientos de energía cuando el sistema ahorrador de glucosa se activa ^(1,28). Macías-Cruz et al ⁽³³⁾ mencionan que, en ovinos, las concentraciones séricas de glucosa, colesterol, triglicéridos, proteína total y urea varían de acuerdo al tipo de EC. Un EC crónico reduce las concentraciones séricas de los metabolitos asociados al metabolismo energético (glucosa, colesterol y triglicérido), pero aumenta las concentraciones de los metabolitos asociados con el metabolismo de proteína (proteína total y urea). En el caso de EC agudo, las variaciones en las concentraciones sanguíneas de esos metabolitos muestran un efecto contrario al observado en EC crónico, lo cual obedece a que el metabolismo de energía cambia para garantizar una mayor disponibilidad de sustratos energéticos al momento de hacer los ajustes fisiológicos ⁽³⁾.

Finalmente, la glándula tiroidea también juega un rol importante en la termorregulación de todas las especies, incluyendo los carneros ⁽¹³⁾. El EC causa una reducción en la liberación de hormonas tiroideas, lo cual favorece una menor producción de calor metabólico y carga de calor corporal ^(23,32). Notoriamente, la triyodotironina tiene una vida media más corta y es más termo-sensible que la tiroxina, tal como se demostró en un estudio de carneros de raza Malpura ⁽²³⁾.

3.1.7. Estrés por calor y endocrinología reproductiva del carnero

Los factores ambientales juegan un rol importante en el control de la capacidad reproductiva de los carneros. Un ambiente inadecuado puede causar un estrés al carnero y esto desencadenar alteraciones en la función neuroendocrina del eje reproductivo ⁽³⁴⁾. En regiones cálidas, las Ta altas de verano generan un ambiente de EC para los carneros, conduciéndolos a que prioricen las actividades asociadas a los procesos de termorregulación en lugar de las funciones reproductivas ⁽¹³⁾. De hecho, su capacidad reproductiva podría ser inhibida totalmente en razas susceptibles al EC, mientras que dicha inhibición podría ser parcial o inexistente en razas adaptadas ^(1,15,23).

Los carneros, en respuesta a las condiciones de EC, activan el sistema simpático adreno-medular (SAM) y el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA) ⁽¹²⁾. El SAM estimula la liberación de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) en la médula de las glándulas adrenales ⁽⁹⁾, las cuales inducen una vasodilatación periférica e incrementan la disponibilidad de energía por medio de la gluconeogénesis y lipólisis ^(1,13). Por su parte, el eje HHA comienza su activación con la secreción hipotalámica de las hormonas liberadoras de corticotropinas (CRH), quienes a su vez estimulan la secreción de la hormona adrenocorticotrópica (ACTH) en la adenohipófisis ^(12,13,17). Adicionalmente, las catecolaminas junto con las CRH provocan la liberación hipotalámica de la β -endorfina, cuyo precursor es el polipéptido proopiomelanocortina, el cual también es precursor de la ACTH ^(17,34). La ACTH vía endocrina estimula la síntesis de glucocorticoides (cortisol y corticosterona) y mineralocorticoide (aldosterona) en la corteza adrenal a partir del colesterol ^(13,17,32). La liberación de cortisol es el principal mecanismo a través del cual el eje HHA inhibe el funcionamiento

del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG) ^(9,11), y consecuentemente, el grado de actividad reproductiva en los carneros expuestos a EC ⁽³⁴⁾.

Los niveles de actividad de los ejes HHA y HHG se relacionan negativamente, de tal manera que comúnmente se observa una disminución en las concentraciones de testosterona y, en consecuencia, en la actividad reproductiva de los carneros en ambientes cálidos ⁽¹⁾. El aumento de cortisol en sangre causa que los niveles de testosterona disponible en los túbulos seminíferos disminuyan, lo cual a su vez reduce la producción y calidad de espermatozoides por una baja actividad en el proceso de espermatogénesis ^(35,36). Asimismo, las bajas concentraciones de testosterona causan que los carneros presenten libido y capacidad de monta reducida ⁽³⁷⁻³⁹⁾.

La testosterona es sintetizada y liberada por las células testiculares de Leydig, las cuales responden al estímulo de la hormona luteinizante (LH) para dicha acción ^(9,40). Por su parte, las células de Sertoli, en respuesta a los estímulos de la hormona folículo estimulante (FSH), sintetizan y liberan la proteína ligadora de andrógenos, quien es responsable de unirse con la testosterona circulante para introducirla a los túbulos seminíferos ⁽⁴⁰⁾. Una vez adentro de los túbulos seminíferos, la testosterona se encarga de sincronizar todo el proceso de espermatogénesis ⁽¹²⁾. Sin embargo, la activación del eje HHA en respuesta al EC puede comprometer negativamente el funcionamiento correcto de este mecanismo en diferentes puntos. Se ha documentado ampliamente que el cortisol genera una retroalimentación negativa sobre GnRH a nivel hipotálamo ^(1,34), situación que a su vez evita que la adenohipófisis sintetice y libere las hormonas gonadotropinas (FSH y LH)^(12,13); ambas esenciales para garantizar la presencia de concentraciones suficientes de testosterona dentro de los túbulos seminíferos, para llevar a cabo la espermatogénesis. Algunos estudios también señalan que las concentraciones de testosterona pueden disminuir por otros mecanismos que no necesariamente están asociados con el funcionamiento del hipotálamo y la hipófisis en carneros sujetos a EC ^(9,12,41).

Las concentraciones de testosterona pueden disminuir debido a que los glucocorticoides reducen la expresión de receptores para LH en las células de Leydig ⁽⁴¹⁻⁴³⁾. También se ha reportado que las células de Leydig requieren de ciertas citoquinas como las IL-1 y IL-6 para la liberación de testosterona, sin embargo, un

aumento en la síntesis de glucocorticoides mostró disminuir la respuesta inmune y, por ende, la producción de dichas citoquinas ^(12,44). Otras evidencias señalan que la producción de la proteína ligadora de andrógenos en las células de Sertoli puede disminuir por una baja producción de hormonas tiroideas ^(22,45). En forma similar, por efecto directo de una hipertermia testicular, las células germinales pueden dañarse, así como afectarse negativamente la expresión de la proteína Conexina-43, encargada de la unión entre las células de Sertoli ⁽⁴⁶⁾. Estas alteraciones a nivel de células de Sertoli podrían conducir a una baja disponibilidad de testosterona dentro de los túbulos seminíferos ⁽¹²⁾. Cabe mencionar que algunos de esos estudios no fueron hechos en carneros, por lo que pueden ser motivo de futuras líneas de investigación.

3.1.8. Estrés por calor y capacidad reproductiva del carnero

Efectos en la calidad seminal

La calidad seminal en los carneros disminuye bajo condiciones de EC debido a la activación de los mecanismos neuroendocrinos, fisiológicos y metabólicos, así como al aumento en el gasto energético de mantenimiento para conservar condiciones de normotermia ⁽¹⁾. Generalmente, los daños ocasionados en los espermatozoides por EC se vuelven visibles entre los 14 y 21 días posteriores al inicio de la exposición de los carneros a Ta altas ⁽⁴⁷⁾, por consiguiente, se detecta hasta entonces una disminución en la calidad seminal.

Las características seminales principalmente afectadas son motilidad progresiva, anormalidades espermáticas, integridad de la membrana plasmática, concentración espermática y volumen del eyaculado (Cuadro 3) ^(1,48). La motilidad progresiva y masal disminuyen entre un 5 y 25 % ^(49,50), lo cual se asocia con un aumento en el porcentaje de espermatozoides anormales ⁽¹⁶⁾. Las anormalidades espermáticas que predominan debido al EC son los defectos en cabeza y acrosomales ⁽⁵¹⁾. Cabe mencionar que dichas anormalidades son menos frecuentes en los sementales de razas autóctonas de regiones cálidas, de tal manera que estas razas adaptadas a EC presentan entre 1 y 5 % de espermatozoides anormales ^(49,52).

El perímetro escrotal y la concentración espermática también han mostrado disminuir por efecto del EC ⁽¹⁶⁾, lo cual posiblemente esté relacionado con una menor

proliferación de células espermáticas y una mayor apoptosis de células del parénquima testicular ⁽⁴⁷⁾. Algunos estudios señalan una disminución de 2 a 7 cm en el perímetro escrotal y de 3,000 millones de espermatozoides por mililitro de eyaculado, tras someter a los carneros a condiciones de EC ^(52,53).

Por otra parte, la actividad secretora de las glándulas accesorias disminuye en carneros sujetos a EC, lo cual directamente se refleja en menor volumen de eyaculado ^(36,53-55). La menor secreción de plasma seminal en las glándulas accesorias se debe a una disminución en las concentraciones séricas de testosterona en carneros expuestos a EC ^(12,56). Adicionalmente, la composición del plasma seminal se modifica, principalmente a nivel de las concentraciones de electrolitos y proteínas, compuestos que mantienen el pH seminal entre neutro y ligeramente alcalino (7.0 a 7.3) ⁽¹¹⁾. En general, el EC incrementa el pH seminal de los carneros ^(52,57), lo cual reduce el número de espermatozoides por eyaculado y aumenta el porcentaje de anormalidades ⁽³⁶⁾.

En resumen, las Ta ambientales elevadas afectan negativamente la fertilidad del carnero, esencialmente por disminuir la producción de espermatozoides, así como la cantidad y calidad del plasma seminal. Esto termina teniendo un impacto negativo en las características microscópicas del semen. Cabe mencionar que los carneros estresado por calor no recuperan inmediatamente su fertilidad óptima al cambiarlos a un ambiente termoneutral; de hecho, requieren permanecer entre 9 y 11 semanas en este ambiente para eyacular un semen de calidad normal ⁽⁴⁷⁾.

Efectos en la conducta sexual

La conducta sexual de los carneros se ha evaluado poco bajo condiciones de EC, y los resultados hasta ahora son contradictorios. Considerando que el servicio de las hembras se da mayormente por monta natural en los diferentes sistemas de producción, resulta imperante elucidar en investigaciones futuras el impacto del EC en la capacidad de monta de los carneros.

En carneros de raza Malpura (adaptada a climas cálidos), el EC inducido en cámara termo-ambiental (42 °C) redujo el apetito sexual y la capacidad de monta, lo cual se dedujo porque los carneros estresados por calor presentaron mayor tiempo para hacer una monta con eyaculación, así como mayor número de intentos de monta

tanto para el primer y segundo eyaculado ⁽⁵³⁾. Igualmente, los carneros de raza Rembi presentaron menor libido durante la época de verano en una región árida ⁽³⁸⁾. La reducción en la conducta sexual mostrada por los carneros expuestos a EC se asoció con una menor capacidad para secretar testosterona. Sin embargo, hay otros estudios realizados en carneros puros ⁽²³⁾ o cruzados ⁽⁷⁾ del genotipo Malpura, donde los efectos del EC en la conducta sexual fueron mínimos sin ninguna diferencia en las concentraciones séricas de testosterona. En carneros de raza de pelo usados en México, un estudio reportó solamente un aumento en el tiempo de reacción de monta por el efecto de la época seca y caliente comparado con la época fresca-húmeda de un clima tropical ⁽³⁹⁾.

Las discrepancias entre resultados podrían deberse a que en esos estudios donde no hubo efectos ^(7,23), las diferencias en Ta no eran tan marcadas. Otros factores importantes a considerar son la condición corporal (CC) y la estacionalidad reproductiva. Los carneros con CC óptima (3.0 en escala de 1 a 5 puntos) presentan mejor conducta sexual que los carneros con baja (≤ 2 puntos) o alta (≥ 4 puntos) CC bajo condiciones de EC ⁽³⁷⁾. Por su parte, la época de verano representa un periodo de transición entre el final del periodo de anestro e inicio del periodo natural reproductivo ⁽⁵⁸⁾. Por lo tanto, los carneros de las razas con mayor sensibilidad a la estacionalidad reproductiva podrían presentar una reducción en la conducta sexual durante el verano en regiones cálidas, no solo por las temperaturas altas, sino también por su ritmo circanual reproductivo natural. En el caso de las razas ovinas de pelo mexicanas, las cuales se caracterizan por presentar baja estacionalidad reproductiva pero alta adaptación a climas cálidos ⁽⁵⁾, los efectos negativos esperados del EC en su conducta sexual podrían ser mínimos, tal como se demostró en condiciones tropicales ⁽³⁹⁾. No obstante, poco se ha investigado este tema en carneros de razas de pelo y los estudios existentes aún son superficiales. Las razas de pelo en México tienen gran relevancia para la producción en carne en climas cálidos, por lo que resulta necesario investigar a profundidad el impacto que tiene el EC en la conducta de estos carneros.

Efectos en el daño espermático

El daño espermático por EC se comienza a generar desde las células espermáticas que están en diferenciación dentro de los túbulos seminíferos hasta los espermatozoides que están en tránsito en el epidídimo. Los espermatozoides en los carneros duran en maduración dentro del epidídimo entre 13 y 15 días, por lo cual son los primeros en evidenciar daños por hipertermia ⁽⁵⁹⁾. Estudios previos reportan que la exposición de carneros a T_a mayores a 35 °C puede causar 17.5 % de cabezas piriformes ⁽⁶⁰⁾, 18.5 % de anomalías en acrosoma ⁽⁶¹⁾ y alrededor de 30 % de espermatozoides sin cola ⁽³⁵⁾. En general, se estima que el EC crónico (> 60 días) causa en los espermatozoides un 43.4 % de anomalías menores (por ejemplo: presencia de gota citoplasmática distal, cola enrollada de la punta o completamente enrollada y cabezas normales libres) y 3.6 % de anomalías mayores (p.ej. gota citoplasmática proximal y espermatozoides microcefálicos) ⁽⁵⁷⁾. Otro estudio indicó que la elipticidad de la cabeza aparece en los eyaculados de los sementales ovinos a partir del día 42 posterior a la hipertermia testicular, lo cual se asocia a un daño directo del EC al espermatozoide en la fase de espermiogénesis, aunque no es claro el mecanismo que lleva a esta malformación de la cabeza ⁽⁶²⁾. Cabe mencionar que el daño espermático generado por EC se vuelve constante mientras dichas condiciones ambientales permanecen, y generalmente se proyecta por varias semanas más después de que el desafío térmico termina ^(1,50).

Los testículos deben permanecer entre 2 y 8 °C por debajo de la temperatura corporal para su correcto funcionamiento, de lo contrario, la hipertermia testicular provoca daños en las células somáticas y germinales del testículo ⁽⁶³⁾. Los espermatozoides y espermatocitos se consideran más susceptibles a sufrir apoptosis por efecto del EC debido a su alta tasa meiótica ^(1,47), aunque también puede ocurrir degeneración en espermatogonias, y células de Leydig y Sertoli ^(23,64). Al parecer el EC crónico, pero no el agudo, afecta a los espermatozoides que ya han concluido su formación y se encuentran en el epidídimo ^(63,64). Los espermatozoides localizados en el epidídimo aumentan su nivel de estrés oxidativo y disminuyen su capacidad antioxidante en respuesta a la exposición continua y prolongada al EC ⁽⁶³⁾. Esto último

se ha demostrado ampliamente en ratones, por lo que se requiere investigar al respecto en carneros.

Por otra parte, el flujo sanguíneo en los testículos de los carneros expuestos a EC es insuficiente, lo que causa hipoxia testicular y, junto con la hipertermia directa, promueve condiciones de estrés oxidativo por un aumento en las especies reactivas de oxígeno (ERO)⁽⁶³⁾. La excesiva producción testicular de ERO conduce a la peroxidación de los fosfolípidos de la membrana espermática, desencadenando un daño directo a nivel de integridad de membrana (20 % de degradación) y del ADN ⁽²³⁾. Estos daños pueden disminuir la expresión de la proteína PH-20 en la membrana, la cual se encuentra asociada a la actividad de la unión del espermatozoide con la zona pelúcida ⁽⁶⁵⁾. Además, hacen más susceptibles a los espermatozoides de los carneros a daños en la conformación de la cromatina ⁽¹¹⁾, y a la presencia de fragmentación del ADN ^(47,65). Este daño en el ADN espermático puede causar subfertilidad o infertilidad del carnero ⁽¹¹⁾, así como una disminución en la resistencia de los espermatozoides cuando se utilizan en programas de inseminación artificial y fertilización in vitro ⁽⁵¹⁾.

3.1.9. Mitigación del estrés por calor en carneros

El uso de estrategias de mitigación del EC es una necesidad para mejorar la capacidad reproductiva de los carneros en climas cálidos. Existe gran variedad de estrategias que pueden implementarse; sin embargo, no todas son igual de eficientes en todos los climas y sistemas de producción. Por ejemplo, en razas de lana, la esquila en los meses de verano es una estrategia ampliamente usada para mejorar la capacidad de termorregulación en carneros, sin embargo, en Argentina reportaron que la incidencia de cabezas espermáticas elípticas aumentó (76 %) en carneros Merino Australiano por esquilarlos completamente en un ambiente de EC ⁽⁶²⁾. Similarmente, la esquila en carneros de raza de pelo Desert Hamari resultó efectiva para mejorar la termorregulación, pero contraproducente para la calidad seminal durante la época de verano ⁽⁶⁰⁾. Por su parte, Rathore ⁽⁶¹⁾ encontró 16 % menos cantidad de anomalías espermáticas por esquilar los testículos en carneros. Estos hallazgos sugieren la necesidad de realizar más estudios para determinar la efectividad de esta estrategia de mitigación del EC para mejorar la fertilidad del carnero.

En sementales Morada Nova y Santa Inés, la capacidad de termorregulación y la circunferencia escrotal y firmeza testicular mejoraron, además, las anomalías espermáticas disminuyeron por debajo del 4 % debido a la instalación de sombras ⁽⁶⁶⁾. De forma similar, la implementación de sombras de asbesto mejoró el mantenimiento de normotermia en carneros de raza Barki ⁽⁶⁷⁾. Por otro lado, un aumento en el flujo de aire en presencia de T_a altas aportó ventajas en las variables fisiológicas de los carneros ⁽¹⁰⁾. Además, el uso de camas de paja en los corrales de alojamiento de los carneros mejoró la pérdida de calor corporal por conducción ⁽¹⁾; sin embargo, no se tiene conocimiento del efecto de sistemas de enfriamiento o el uso de distintos materiales para cama sobre la actividad reproductiva del carnero.

Se ha observado en ovejas y corderos de engorda que la suplementación alimenticia con proteínas, lípidos, antioxidantes y minerales, mejora la manera en que enfrentan el EC ^(1,68,69). Sin embargo, en carneros solamente hay información del uso de antioxidantes como estrategia de mitigación de los efectos del EC. La suplementación dietaria del antioxidante γ -oryzanol en carneros disminuyó en 26 % la producción de ERO e incrementó el porcentaje de espermatozoides con membrana intacta tras la hipertermia testicular; sin embargo, también hubo un aumento en las anomalías espermáticas ⁽⁵⁹⁾. La administración parenteral de vitamina E o vitamina E más selenio, mejoró la calidad seminal y el apetito sexual de sementales Awassi sometidos a T_a de 43 a 54 °C ⁽⁷⁰⁾. Cabe mencionar que se necesita desarrollar investigación sobre algunas estrategias nutricionales que puedan ayudar a minimizar los efectos negativos del EC en la reproducción de los carneros.

Por otra parte, con la intención de mejorar la capacidad de termorregulación en la descendencia, se ha optado por la selección de progenitores de razas autóctonas, que muestren capacidad de termorresistencia y adaptación al ambiente en que se han desarrollado ⁽²⁷⁾. De este modo, crece el interés por la identificación de marcadores genéticos como el gen de fecundidad Booroola (FecB), el cual aparte de incrementar la prolificidad de las ovejas, también influye positivamente en mejorar la capacidad de producir semen de calidad deseable bajo condiciones de clima cálido semi-árido en carneros de raza pura Garole o cruza con Mampara ^(23,71).

3.1.10. Conclusiones

A pesar de las características de resistencia y rusticidad natural que poseen los ovinos, el EC provoca en el carnero una serie de cambios fisiológicos y metabólicos que modifican el balance energético y hormonal reproductivo, lo que finalmente repercute en forma negativa en las concentraciones sanguíneas de testosterona y, por ende, en la calidad seminal y conducta sexual. Aunado a esto, la hipertermia ocasiona daños directos a nivel de membrana y ADN del espermatozoide, disminuyendo su capacidad fecundante. Por lo tanto, el uso de estrategias de mitigación del EC en carneros es una necesidad para mantener la fertilidad en el rebaño, particularmente en la época caliente del año de climas cálidos. La estrategia de mitigación de EC a usar dependerá del tipo (agudo o crónico) e intensidad del EC (moderado o severo) al que se exponga el carnero, así como a su grado de adaptación al clima, por lo cual podría usarse desde una simple área sombreada con o sin ventiladores, hasta la suplementación de aditivos como antioxidantes.

3.1.11. Literatura citada

1. Sejian V, Bhatta R, Gaughan J, Malik PK, Naqvi S, Lal R. Sheep production adapting to climate change. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2017.
2. Bernabucci U, Lacetera N, Baumgard LH, Rhoads RP, Ronchi B, Nardone A. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 2010;4(7):1167-1183.
3. Al-Dawood A. Towards heat stress management in small ruminants—a review. *Ann Anim Sci* 2017;17(1):59-88.
4. Marai IFM, El-Darawany AA, Fadiel A, Abdel-Hafez MAM. Physiological traits as affected by heat stress in sheep — A review. *Small Ruminant Res* 2007;71(1):1-12.
5. Vicente-Pérez R, Macías-Cruz U, Avendaño-Reyes L, Correa-Calderón A, López-Baca MA, Lara-Rivera AL. Impacto del estrés por calor en la producción de ovinos de pelo. *Rev Mex Cienc Pecu* 2020;11(1):205-222.

6. Bett B, Kiunga P, Gachohi J, Sindato C, Mbotha D, Robinson T, *et al.* Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Prev Vet Med* 2017;137:119-129.
7. Kumar D, Sejian V, Gaughan JB, Naqvi SMK. Biological functions as affected by summer season-related multiple environmental stressors (heat, nutritional and walking stress) in Malpura rams under semi-arid tropical environment. *Biol Rhythm Res* 2017;48(4):593-606.
8. Belhadj SI, Mohamed C, Najjar T, Ghram A. Meta-analysis of some physiologic, metabolic and oxidative responses of sheep exposed to environmental heat stress. *Livest Sci* 2019;229:179–187.
9. Tort L, Teles M. The endocrine response to stress-a comparative view. In: Akin F editor. *Basic and clinical endocrinology up-to-date*. InTech; 2011:263-286.
10. Wojtas K, Cwynar P, Kołacz R. Effect of thermal stress on physiological and blood parameters in merino sheep. *Bull Vet Inst Pulawy* 2014;58(2):283-288.
11. Rahman MB, Schellander K, Luceno NL, Van Soom A. Heat stress responses in spermatozoa: Mechanisms and consequences for cattle fertility. *Theriogenology* 2018;113:102-112.
12. Damián JP, Bausero M, Bielli A. Acute stress, hypothalamic-hypophyseal-gonadal axis and testicular function—A review. *Ann Anim Sci* 2015;15(1):31-50.
13. Binsiya T, Sejian V, Bagath M, Krishnan G, Hyder I, Manimaran A, *et al.* Significance of hypothalamic-pituitary-adrenal axis to adapt to climate change in livestock. *Int Res J Agri Food Sci* 2017;2(1):1-20.
14. Aké-López J, Aké-Villanueva N, Segura-Correa J, Aké-Villanueva J, Montes-Pérez R. Effect of age and season on semen traits and serving capacity of Pelibuey rams under tropical conditions. *Livest Res Rural Dev* 2016;28(9):166. <http://www.lrrd.org/lrrd28/9/akel28166.htm>. Accessed Nov 25, 2019.
15. Kahwage PR, Esteves SN, Jacinto MAC, Junior WB, Machado R, Romanello N, *et al.* Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Ruminant Res* 2018;160:72-80.

16. Moura ABB, Brandao FZ, Esteves SN, de Souza GN, da Fonseca JF, Pantoja MHA, *et al.* Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology* 2019;123:123-131.
17. Inbaraj S, Sejian V, Bagath M, Bhatta R. Impact of heat stress on immune responses of livestock: a review. *Pertanika J Trop Agric Sci* 2016;39(4):459-482.
18. Li FK, Yang Y, Jenna K, Xia CH, Lv SJ, Wei WH. Effect of heat stress on the behavioral and physiological patterns of Small-tail Han sheep housed indoors. *Trop Anim Health Prod* 2018;50(8):1893-1901.
19. Leite PG, Marques JI, Furtado DA, Lopes Neto JP, de Souza BB, do Nascimento JWB. Ethology, physiological, and ingestive responses of sheep subjected to different temperatures and salinity levels of water. *Int J Biometeorol* 2019;63(8):1091-1098.
20. Collier RJ, Baumgard LH, Zimbelman RB, Xiao Y. Heat-stress: physiology of acclimation and adaptation. *Anim Frontier* 2019;9(1):12-19.
21. Macías-Cruz U, Correa-Calderón A, Mellado M, Meza-Herrera CA, Aréchiga CF, Avendaño-Reyes L. Thermoregulatory response to outdoor heat stress of hair sheep females at different physiological state. *Int J Biometeorol* 2018;62(12):2151-2160.
22. Macías-Cruz U, Álvarez-Valenzuela FD, Correa-Calderón A, Díaz-Molina R, Mellado M, Meza-Herrera CA, *et al.* Thermoregulation of nutrient-restricted hair ewes subjected to heat stress during late pregnancy. *J Therm Biol* 2013;38(1):1-9.
23. De K, Kumar D, Balaganur K, Kumar Saxena V, Thirumurugan P, Khursheed Naqvi SM. Effect of thermal exposure on physiological adaptability and seminal attributes of rams under semi-arid environment. *J Therm Biol* 2017;65:113-118.
24. Fonsêca VFC, Maia ASC, Saraiva EP, de Melo Costa CC, da Silva RG, Abdoun KA, *et al.* Bio-thermal responses and heat balance of a hair coat sheep breed raised under an equatorial semi-arid environment. *J Therm Biol* 2019;84:83-91.

25. Cain IJW, Krausman PR, Rosenstock S, Turner JC. Mechanisms of thermoregulation and water balance in desert ungulates. *Wildl Soc Bull* 2006;34(3):570-581.
26. NRC. National Research Council. Nutrient requirements of sheep. 6th ed. Washington, DC, USA: National Academy Press; 1985.
27. Berihulay H, Abied A, He X, Jiang L, Ma Y. Adaptation mechanisms of small ruminants to environmental heat stress. *Animals* 2019;9(3):75.
28. Baumgard LH, Rhoads RP, Jr. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu Rev Anim Biosci* 2013;1:311-337.
29. Mahjoubi E, Yazdi MH, Aghaziarati N, Noori GR, Afsarian O, Baumgard LH. The effect of cyclical and severe heat stress on growth performance and metabolism in Afshari lambs. *J Anim Sci* 2015;93(4):1632-1640.
30. Khalek TMMA. Thermoregulatory responses of sheep to starvation and heat stress conditions. *Egyptian J Anim Prod* 2007;44(2):137-150.
31. Al-Haidary A, Aljumaah R, Alshaikh M, Abdoun K, Samara E, Okab A, *et al.* Thermoregulatory and physiological responses of Najdi sheep exposed to environmental heat load prevailing in Saudi Arabia. *Pak Vet J* 2012;32(4):515-519.
32. Nazifi S, Saeb M, Rowghani E, Kaveh K. The influences of thermal stress on serum biochemical parameters of Iranian fat-tailed sheep and their correlation with triiodothyronine (T₃), thyroxine (T₄) and cortisol concentrations. *Comp Clin Path* 2003;12(3):135-139.
33. Macías-Cruz U, López-Baca MA, Vicente R, Mejía A, Álvarez FD, Correa-Calderón A, *et al.* Effects of seasonal ambient heat stress (spring vs. summer) on physiological and metabolic variables in hair sheep located in an arid region. *Int J Biometeorol* 2016;60(8):1279-1286.
34. Charmandari E, Tsigos C, Chrousos G. Endocrinology of the stress response. *Annu Rev Physiol* 2005;67:259-284.
35. Braden A, Mattner P. The effects of scrotal heating in the ram on semen characteristics, fecundity, and embryonic mortality. *Aust J Agric Res* 1970;21(3):509-518.

36. Chella L, Kunene N, Lehloenya K. A comparative study on the quality of semen from Zulu rams at various ages and during different seasons in KwaZulu-Natal, South Africa. *Small Ruminant Res* 2017;151:104-109.
37. Maurya VP, Sejian V, Kumar D, Naqvi SM. Effect of induced body condition score differences on sexual behavior, scrotal measurements, semen attributes and endocrine responses in Malpura rams under hot semi-arid environment. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2010;94(6):e308-e317.
38. Benia A, Taibi K, Ait-Amrane A, Belhamiti T, Hammoudi S, Kaidi R. Study of seasonal sexual activity variations in Algerian rams: Sexual behaviour, testosterone concentration control and environmental factors. *Afr J Biotechnol* 2013;12(41):6042-6048.
39. Cárdenas-Gallegos M, Aké-López J, Magaña-Monforte J, Centurión-Castro F. Libido and serving capacity of mature hair rams under tropical environmental conditions. *Arch Med Vet* 2015;47(1):39-44.
40. Senger PL. Pathways to pregnancy and parturition. 3rd ed. Pullman, Washington: Current conceptions, Inc; 2012.
41. Byers SW, Glover TD. Effect of scrotal insulation on the pituitary-testicular axis of the ram. *J Reprod Fertil* 1984;71(1):23-31.
42. Huanca W, Coronado L, Galloway DB. Efecto de la manipulación de la temperatura escrotal sobre las características clínicas, seminales y endocrinas en carneros. *Rev Inv Vet Perú* 2015;26(4):604-613.
43. Narayan E, Parisella S. Influences of the stress endocrine system on the reproductive endocrine axis in sheep (*Ovis aries*). *Ital J Anim Sci* 2017;16(4):640-651.
44. Tsigos C, Papanicolaou DA, Kyrou I, Raptis SA, Chrousos GP. Dose-dependent effects of recombinant human interleukin-6 on the pituitary-testicular axis. *J Interferon Cytokine Res* 1999;19(11):1271-1276.
45. Patel N, Kashanian JA. Thyroid dysfunction and male reproductive physiology. *Semin Reprod Med* 2016;34(6):356-360.

46. Hassanpour H, Kadivar A, Mirshokraei P, Nazari H, Afzali A, Badisanaye M. Connexin-43: A possible mediator of heat stress effects on ram Sertoli cells. *Vet Res Forum* 2015;6(2):125-130.
47. Alves MB, Andrade AF, Arruda RP, Batissaco L, Florez-Rodriguez SA, Oliveira BM, *et al.* Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology* 2016;86(3):795-805.e2.
48. Saab SA, Sleiman FT, Kallassy N, Darweesh WY, Aad PY. Effect of adaptation and heat stress on reproductive performances of fat-tail Awassi rams in eastern mediterranean. *Leban Sci J* 2011;12(1):31-44.
49. Karagiannidis A, Varsakeli S, Alexopoulos C, Amarantidis II. Seasonal variation in semen characteristics of Chios and Friesian rams in Greece. *Small Ruminant Res* 2000;37(1):125-130.
50. Panyaboriban S, Suwimonteerabutr J, Swangchan-Uthai T, Tharasanit T, Phutikanit N, Techakumphu M. Effect of heat stress on reproductive performance of an imported dorper ram: a case study in Thailand. *Thai J Vet Med* 2016;46(4):671-677.
51. Francis JR, Javvaji PK, Dhali A, Kolte AP, Roy SC, Giridhar K, *et al.* Seasonal variations in quality, preservability and fertilizing ability of ovine spermatozoa. *Biol Rhythm Res* 2019:1-12.
52. Marai IFM, El-Darawany AHA, Ismail ESAF, Abdel-Hafez MAM. Tunica dartos index as a parameter for measurement of adaptability of rams to subtropical conditions of Egypt. *Anim Sci J* 2006;77(5):487-494.
53. Maurya VP, Sejian V, Kumar D, Naqvi SMK. Impact of heat stress, nutritional restriction and combined stresses (heat and nutritional) on growth and reproductive performance of Malpura rams under semi-arid tropical environment. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2016;100(5):938-946.
54. Kafi M, Safdarian M, Hashemi M. Seasonal variation in semen characteristics, scrotal circumference and libido of Persian Karakul rams. *Small Ruminant Res* 2004;53(1):133-139.

55. Suhair SM, Abdalla MA. Effects of seasonal changes and shearing on thermoregulation, blood constituents and semen characteristics of desert rams (*Ovis aries*). *Pak J Biol Sci* 2013;16(24):1884-1893.
56. Belkadi S, Safsaf B, Heleili N, Tlidjane M, Belkacem L, Oucheriah Y. Seasonal influence on sperm parameters, scrotal measurements, and serum testosterone in Ouled Djellal breed rams in Algeria. *Vet World* 2017;10(12):1486-1492.
57. Moreira EP, Moura AdAA, Araújo AAd. Efeitos da insulação escrotal sobre a biometria testicular e parâmetros seminais em carneiros da raça Santa Inês criados no estado do Ceará. *R Bras Zootec* 2001;30(6):1704-1711.
58. Gastelum-Delgado MA, Avendaño-Reyes L, Álvarez-Valenzuela FD, Correa-Calderón A, Meza-Herrera CA, Mellado M, *et al.* Conducta estral circanual en ovejas Pelibuey bajo condiciones áridas del noroeste de México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2015;6(1):109-118.
59. Escobar E, Lopes S, Malavolta C, Ramalho JB, Missio D, Pinto HF, *et al.* Effect of gamma-oryzanol on testicular degeneration induced by scrotal insulation in rams. *Theriogenology* 2019;128:167-175.
60. Rathore AK. A note on the effect of scrotal wool cover on morphological changes in ram spermatozoa due to heat stress. *Anim Prod* 1969;11(4):561-563.
61. Rathore AK. Acrosomal abnormality in ram spermatozoa due to heat stress. *Br Vet J* 1970;126(8):440-443.
62. Armengol MF, Sabino GA, Forquera JC, de la Casa A, Aisen EG. Sperm head ellipticity as a heat stress indicator in Australian Merino rams (*Ovis aries*) in Northern Patagonia, Argentina. *Theriogenology* 2015;83(4):553-559.e2.
63. Hamilton TR, Mendes CM, de Castro LS, de Assis PM, Siqueira AF, Delgado JdC, *et al.* Evaluation of lasting effects of heat stress on sperm profile and oxidative status of ram semen and epididymal sperm. *Oxid Med Cell Longev* 2016:12.
64. Silva LKX, Sousa JS, Silva AOA, Lourenco Junior JB, Faturi C, Martorano LG, *et al.* Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. *Andrologia* 2018;50(2):e12836.

65. Fleming JS, Yu F, McDonald RM, Meyers SA, Montgomery GW, Smith JF, *et al.* Effects of scrotal heating on sperm surface protein PH-20 expression in sheep. *Mol Reprod Dev* 2004;68(1):103-114.
66. Kahwage PR, Esteves SN, Jacinto MAC, Junior WB, Pezzopane JRM, de Andrade-Pantoja MH, *et al.* High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. *Int J Biometeorol* 2017;61(10):1819-1829.
67. Hassanin S, Abdalla E, Kotby E, Abd-Elaziz A, El-Fouly M. Efficiency of asbestos shading for growth of Barki rams during hot summer. *Small Ruminant Res* 1996;20(3):199-203.
68. Can A, Denek N, Yazgan K. Effect of replacing urea with fish meal in finishing diet on performance of Awassi lamb under heat stress. *Small Ruminant Res* 2005;59(1):1-5.
69. Sejian V, Singh AK, Sahoo A, Naqvi SM. Effect of mineral mixture and antioxidant supplementation on growth, reproductive performance and adaptive capability of Malpura ewes subjected to heat stress. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2014;98(1):72-83.
70. Talib AAB, Bomboi G, Floris B. Does vitamin E or vitamin E plus selenium improve reproductive performance of rams during hot weather? *Ital J Anim Sci* 2009;8(4):743-754.
71. Kumar D, Naqvi SMK, Kumar S. Sperm motion characteristics of FecBBB and FecBB+ Garole x Malpura rams during the non-breeding season under hot semi-arid environment. *Livest Sci* 2012;150(1):337-341.
72. De K, Kumar D, Saxena VK, Naqvi SM. Study of circadian rhythmicity of physiological response and skin temperature of sheep during summer and winter in semi-arid tropical environment. *Physiol Behav* 2017;169:16-21.
73. Pantoja MHA, Esteves SN, Jacinto MAC, Pezzopane JRM, Paz CCP, Silva J, *et al.* Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J Therm Biol* 2017;69:302-310.

74. Cwynar P, Kolacz R, Czerski A. Effect of heat stress on physiological parameters and blood composition in Polish Merino rams. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2014;127(5/6):177-182.

3.1.12. Cuadros y Figuras

Cuadro 1. Cambios que se presentan en las variables fisiológicas de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.

Fuente	Raza	Tratamiento / época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(53)	Suffolk	Invierno	14.50	↑ TR, TE
		Verano	28.20	
(45)	Najdi	Invierno	19.8 ± 0.4	↑ TR, FR y FC
		Verano	38.4 ± 0.3	
(72)	Malpura	Invierno	7.0 - 25.5	↑ FR y FC
		Verano	23.0 - 40.0	
(15)	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ TR, FC y TS
		Verano	~ 18.0 - 32.0	
	Morada	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ TR, FC y TS
		Nova	Verano	
(73)	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 27.0	ns
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
	Morada	Invierno	~ 12.5 - 27.0	↓ FR y ↑ TMT
		Nova	Verano	
	Texel	Invierno	~ 12.5 - 27.0	Sin cambios
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
	Dorper	Invierno	~ 12.5 - 27.0	↓ FR y ↑ TMT
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
(18)	Han de cola pequeña	Termoneutral	~ 22.0 - 23.0	↑ FR
		Estrés calórico	~ 30.0 - 35.0	
(74)	Merino polaco	Termoneutral	16.5 ± 1.0	↑ TR y FR
		Estrés calórico	50.0 ± 1.0	
(10)	Merino	Termoneutral	20.1 - 20.9	↑ FR y FC
		Estrés calórico	28.6 - 30.6	
(23)	Malpura x Garole	Termoneutral	33.6 ± 0.7	↑ TR y FR
		Estrés calórico	44.2 ± 0.2	

TR= Temperatura rectal; FR= frecuencia respiratoria; FC= frecuencia cardíaca; TE= temperatura escrotal; TMT= temperatura media testicular; TS= tasa de sudoración; ns= Sin cambios significativos.

Cuadro 2. Cambios que se presentan en los metabolitos sanguíneos de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.

Fuente	Raza	Tratamiento / época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(44)	Ossimi	Invierno	24.1	↑ GLU
		Verano	33.7	↓ COL y LIPT
(45)	Najdi	Invierno	19.8 ± 0.4	↑ GLU y PROT
		Verano	38.3 ± 0.3	
(23)	Malpura x Malpura x Garole	Termoneutral	33.6 ± 0.7	↓ PROT y T ₃ ↑ COR
		Estrés calórico	44.2 ± 0.2	
(10)	Merino	Termoneutral	20.1 - 20.9	↑ COR
		Estrés calórico	28.6 - 30.6	
(24)	Iraní fat-tailed	Termoneutral	21.0	↓ GLU, TRIG, T ₃ y T ₄ ↑ PROT y COR
		Estrés calórico	40.0	
(74)	Merino polaco	Termoneutral	16.5 ± 1.0	↓ GLU ↑ COR
		Estrés calórico	50.0 ± 1.0	
(18)	Han de cola pequeña	Termoneutral	~ 22.0 - 23.0	↓ TRIG, PROT
		Estrés calórico	~ 30.0 - 35.0	

G LU= glucosa; COL= colesterol; TRIG= triglicéridos; PROT= proteína total; LIPT= lípidos totales; COR= cortisol; T₃= triyodotironina; T₄= tiroxina.

Cuadro 3. Cambios que se presentan en las características seminales de ovinos bajo condiciones de estrés calórico.

Fuente	Raza	Tratamiento / época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(50)	Chios	Otoño	9.7 - 18.3	↓ MOT y CON
		Verano	19.1 - 30.6	↑ AE
	Friesian	Otoño	9.7 - 18.3	↓ MOT y CON
		Verano	19.1 - 30.6	↑ MP y AE
(55)	Karakul	Invierno	5.8 ± 3.8	↓ VOL
		Verano	26.0 ± 4.8	↑ VIT y TES
(53)	Suffolk	Invierno	14.5	↓ CE, MM, VIT y CON
		Verano	28.2	↑ pH seminal, AE y daño acrosomal
(56)	Hamari (no esquilados)	Invierno	14.1 - 32.4	↓ VOL, VIT, MM y MP
		Verano	22.9 - 43.3	↑ AE
	Hamari (esquilados)	Invierno	14.1 - 32.4	↓ VOL, MM y VIT
		Verano	22.9 - 43.3	↑ AE
(51)	Dorper	Invierno	18.0 - 26.0	↓ CE, CON, MM y MP
		Verano	26.0 - 32.0	↑ AE
(26)	Zulu	Invierno	23.3	↓ VOL, CON e INT
		Verano	28.3	↑ CE
(15)	Morada Nova	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ CON y AES
		Verano	~ 18.0 - 32.0	
	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↓ INT
		Verano	~ 18.0 - 32.0	↑ CON
(14)	Pelibuey	Invierno	--	↓ CE y CON
		Otoño	26.0 - 27.8	↑ AE
(57)	Ouled Djellal	Primavera	--	↓ CE, VIT y TES
		Verano	33.0 - 40.0	
(54)	Malpura	Termoneutral	--	↓ CE, VOL, MM, CON y TES
		Estrés calórico	42.0	
(23)	Malpura x	Termoneutral	33.6 ± 0.7	↓ MOT
	Malpura x Garole	Estrés calórico	44.2 ± 0.2	

CE= circunferencia escrotal; MOT= motilidad espermática; MM= motilidad masal; MP= motilidad progresiva; CON= concentración espermática/mL; VOL= volumen de eyaculado; VIT= vitalidad espermática; INT= integridad de membrana plasmática; AE= anomalías espermáticas; AES= anomalías espermáticas secundarias; TES= testosterona sérica.

3.2. Seasonal heat stress compromises testicular thermoregulation and semen quality of Dorper breed rams raised in a desert climate

Alejandra L. Barragán¹, Leonel Avendaño-Reyes¹, Miguel Mellado-Bosque², César A. Meza-Herrera³, Ricardo Vicente-Pérez⁴, Vielka J. Castañeda¹, Raúl Díaz-Molina⁵,
Ulises Macías-Cruz^{1,*}

¹Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas, Valle de Mexicali, Baja California, México.

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Nutrición Animal, Saltillo, Coahuila, 25315, México.

³Universidad Autónoma Chapingo, URUZA, Bermejillo, Durango

⁴Universidad de Guadalajara, CUCSUR, Departamento de Producción Agrícola Autlán de Navarro, Jalisco, 48900, México.

⁵Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Medicina, Mexicali, Baja California, 21100, México.

*Autor de correspondencia: umacias@uabc.edu.mx

Publicado el 2 de noviembre de 2023

Journal of Thermal Biology, en prensa

Factor de impacto JCR: 3.189

Q1 de acuerdo al Scimago Journal Rank

<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103737>

3.2.1. Abstract

Dorper rams are widely distributed throughout the world under different climatic conditions, however, little is known about their reproductive performance in desert regions. Ten Dorper rams were individually housed and exposed to thermoneutrality for 35 d in spring (23.6 ± 5.6 °C, mean \pm SD) and outdoor heat stress (HS) for 35 d in summer (33.6 ± 2.0 °C) to evaluate the effect of seasonal HS on physiological responses, testicular biometry, and seminal quality under desert climatic conditions. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures in different body regions were measured every 7 d (0600, 1200, and 1800 h); also, testicular biometry was registered at 0600 h. Semen was collected via an artificial vagina 3 d after physiological variables were measured and seminal traits were evaluated. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures were higher ($P < 0.01$) at each hour of measurement in summer compared to spring. Overall, scrotal length and circumference, as well as testicular volume were higher ($P < 0.01$) in summer than in spring. Compared to spring conditions, summer HS caused lower ($P \leq 0.05$) sperm concentration and viability combined with a higher percentage of sperm abnormalities without affecting ejaculate volume. Both mass and sperm motility were similar between seasons in the first two sampling weeks, and then decreased ($P \leq 0.03$) due to summer HS. In conclusion, Dorper rams developed testicle hyperthermia and, consequently, showed poor semen quality due to the high environmental temperatures prevailing in desert regions.

Keywords: Fertility, hair sheep, sperm abnormalities, testicular heat stress, spermatogenesis.

3.2.2. Introduction

The objective of global sheep production has been changing in recent decades from wool to meat production (Thorne *et al.*, 2021). This has led to restructuring the

strategies for genetic improvement, replacing or crossing wool-producing sheep with specialized meat breeds. This is also happening with autochthonous breeds of sheep from different regions of the world that present low growth potential (Zlobin *et al.*, 2019). Remarkably, the Dorper sheep (*Ovis aries*) represents a meat breed with greater worldwide popularity due to its excellent growth rate and carcass muscularity, resulting in a good paternal line (terminal sire breed) in breeding programs developed for mutton production (Villatoro *et al.*, 2021). So today, Dorper rams can be seen regularly in sheep flocks in most countries of the world under different production systems and climates (Wajala *et al.*, 2023). This makes it necessary to know the reproductive capacity of these rams under different environmental conditions, particularly those that prevail in a desert climate, since global desertification continues to increase due climate change (Thornton *et al.*, 2021; IPCC, 2023).

The extremely high temperatures occurring during the summer in desert regions represent the main challenge that Dorper rams face to conserve their fertility and productivity throughout the year (Barragán-Sierra *et al.*, 2021). The spermatogenesis process demands a testicular temperature between 32 and 36 °C to maintain both sperm production and quality in sheep, while the summer ambient temperature exceeds 40 °C in some regions (McManus *et al.*, 2020). Thus, in summer, these rams continuously experience outdoor heat stress (HS), which could cause testicular hyperthermia and, consequently, reduced circulating testosterone concentration, testicular biometry and spermatogenesis, as well as sperm damage and low seminal quality, as already described using scrotal insulation (Alves *et al.*, 2016; Junior *et al.*, 2015).

Dorper rams have shown to be thermotolerant to tropical HS conditions by maintaining normothermia (Pantoja *et al.*, 2017) and continuing to reproduce (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2019), however there is little information about their testicular thermoregulation capacity, seminal quality, and reproductive efficiency during the hot season in desert regions. Unlike the tropics and subtropics, sheep in desert areas are more directly exposed to high ambient temperatures and solar radiation due to low rainfall and minimal vegetation cover (De *et al.*, 2017), so the reproductive function of Dorper rams could be further compromised in this environment.

As a result, it was hypothesized that high summer environmental temperatures in desert regions compromise the physiological thermoregulatory capacity of Dorper rams, causing them testicular hyperthermia and poor seminal quality. The objective of the present study was therefore, to evaluate the effect of seasonal heat stress on thermoregulatory ability, testicular biometry, and seminal quality of Dorper rams under desert climatic conditions.

3.2.3. Materials and methods

The experiment was carried at the Local Livestock Association of Mexicali, Baja California, México (32°31' N and 115°12' W). This region presents a desert climate, characterized as dry and warm with extreme average temperatures of ≥ 44 °C between June and September, and low average rainfall per year (77.8 mm; INEGI, 2017). All management of rams was performed within approved Mexican Official Standards (NOM-051-ZOO-1995 and NOM-066-ZOO-1999).

Animals, treatments, and handling

Ten purebred Dorper rams with no visual signs of diseases, initial body weight of 52.3 ± 4.5 kg, body condition score of 3.2 ± 0.2 units (5-point scale; 1 = emaciated and 5 = obese; Russel *et al.* 1969) and 11 months old were selected. They were housed during the experimental period into 4.5 m² individual pens that had mesh shade (2.0 m²), feed trough and drinking trough. The experimental period lasted 100 d, 50 d in mid-spring (thermoneutral conditions) and 50 d in mid-summer (HS conditions), so each of these two seasons was considered a treatment. These study periods were established based on information from bioclimatic indices determined for sheep in the study area (Theusme *et al.*, 2021). Note that the 50-d study period in each season was divided into 15 d of adaptation (pen and overall handling), and 35 d of sampling of study variables. Rams were housed in common corral after finishing the spring experimental period until the beginning of the next.

Rams were fed every day at 0700 and 1900 h with a mixed diet of chopped fodder (50 % oat straw and 50 % alfalfa hay), which met their nutritional requirements according to the NRC (2007). Clean water was available *ad libitum*, while the health of the animals was monitored visually every day and was recorded as good both before and throughout the experimental period.

Measurement of the study variables

All study variables were measured only during the study period (35 d) of each season, at the same time intervals (Fig. 4). Air temperature (T_a , °C) and relative humidity (RH, %) were collected with a thermo-hygrograph (Thermotracker, Higo, Culiacán, Sinaloa, Mexico) installed at the study area, which was programmed to measure every 15 min during the entire sampling period. The temperature-humidity index (THI) was calculated as: $THI = T_a \text{ °F} - [(0.55 - 0.55 RH) * (T_a \text{ °F} - 58)]$, where T_a was expressed in Fahrenheit degrees and RH divided between 100 (LPHSI, 1990). Maximum and minimum average daily values were calculated, as well as the overall average daily value, with their respective standard deviations for all climatic variables.

Respiration rate (RR), rectal temperature (RT) and surface thermography on different body regions (i.e., eye, nostril, ear, head, loin, rump, leg, right flank, ribs, belly, shoulder and scrotum) were the physiological variables measured, which were recorded each 7 days at 0600, 1200 and 1800 h. Firstly, RR was recorded by counting the number of intercostal movements per minute, then rams were immobilized to measure RT by rectal insertion of a digital thermometer (Delta Track, Pleasanton, CA, USA) for one minute, as well as to take two thermal images per animal (face and lateral full body) at a 2.5 m distance with an infrared thermographic camera (Fluke Ti10, Everett, WA, USA). All images were analyzed in a computer using the SmartView® software (version 3.6, Fluke, WA, USA) to determine the average temperature of each evaluated body region.

Testicular biometry was also evaluated by measuring spermatic cord perimeter, and scrotal circumference and length, as well as testicle width, length, and volume, just after physiological variables in the morning. The scrotal circumference was measured

at the height of the largest testicular diameter and the spermatic cord perimeter was assented in the middle part of it, while the scrotal length represented the distance from belly to the bottom of testis; these variables were measured with a flexometer. For its part, dimensions of the right and left testis were measured separately with a caliper, and then averaged to record testicular width (W) and length (L); both measurements were used to calculate testicular volume with the following formula: $V = 4/3 (\Pi) (L/2) (W/2)^2$ (Bailey *et al.*, 1998).

Semen collection was performed weekly using the artificial vagina technique, just three days after measuring physiological variables, to evaluate ejaculate volume and semen quality. For this, rams were previously trained to ejaculate into the artificial vagina by attempting to mount an estrogenized ewe (2 mg of estradiol cypionate i.m., Zoetis, NY, USA) that was restrained by a neck clamp. Thus, on the day of semen extraction, rams were individually led to the collection pen (4 x 4 m) and their collected semen was immediately evaluated for ejaculate volume and microscopy characteristics using standard methods (Hafez and Hafez, 2013). Briefly, the ejaculate volume was measured directly in the graduated conical tube, and microscopy characteristics were assessed with an optical microscope (Model 29AX-E2050223, Motic, Hong Kong, China). While sperm concentration was determined in diluted semen (1:400) using a Neubauer chamber, the mass motility was evaluated at 100x magnification on a drop of undiluted semen applying a 0-5 scale (0= immotile and 5= vigorous waves with eddies). Progressive sperm motility was determined at 400x magnification in semen diluted with 0.9% saline solution, subjectively assigning a value between 0 and 100 % according to the vigor and progressive movement observed in the spermatozoa. Sperm viability was assessed on 200 sperm cells stained with the eosin-niglosin technique and observed at 400x magnification; same methodology was used to evaluate sperm abnormalities (primary and secondary) but using the Esperma-Form staining kit (FertiMéxico Laboratory, D.F., México). Both the number of live sperm and the number of sperm with abnormalities were expressed as a percentage of the number of sperm evaluated to calculate the percentage of viability and abnormalities.

Statistical analysis

Data were analyzed with the SAS program (version 9.4; SAS Inst. Inc., Cary NC). Descriptive statistics were used to summarize climatic variables. The Shapiro-Wilk test was applied to determine normality in all data, and they were transformed until reaching normality when necessary. So, physiological variables, testicular biometry and semen traits were analyzed under a completely randomized design with repeated measures over time using PROC MIXED. All models included fixed effects of season of the year, time (hour or week) and the interaction between them. Animal was nested within treatments as a random effect. Several variance-covariance structures were verified to fit the model, and the compound symmetry showed the best fit according to BIC and AIC criteria. Means were separated using the LSMEANS/PDIFF option, and significant differences were declared at $P \leq 0.05$.

3.2.4. Results

Mean \pm SD values of Ta, RH, THI, wind speed and solar radiation during the spring season were 23.6 ± 5.6 °C, 46.6 ± 16.4 %, 67.7 ± 6.5 units, 1.4 ± 0.5 m/s and 269.2 ± 35.1 W/m², respectively, while in summer were 33.6 ± 2.0 °C, 46.8 ± 14.0 %, 81.1 ± 3.3 units, 1.7 ± 0.6 m/s and 273.2 ± 26.0 W/m², respectively (Table 4 and Fig. 5). Overall, the summer study period was ~ 10 °C hotter than the spring period.

Table 5 shows results of physiological thermoregulation. Most of the physiological variables evaluated were affected ($P \leq 0.05$) by the season \times hour interaction, the exception being RT ($P = 0.64$) and body surface temperatures of anatomical regions: rump ($P = 0.27$), leg ($P = 0.23$), and right flank ($P = 0.11$). So, across daytime (i.e., 0600, 1200 and 1800 h), Dorper rams in summer exhibited higher ($P < 0.01$) RR and surface temperatures of eye, nose, ear, head, neck, loin, ribs, belly, shoulder and scrotum than in spring. In addition, they showed higher ($P < 0.01$) RT and temperatures of rump, leg and right flank in summer than in spring, independently of the hour of the day.

Table 6 and Fig. 6 show testicular biometry results. Only scrotal length, spermatic cord perimeter, and scrotal circumference were affected ($P < 0.01$) by the

season × week interaction, while the rest of the testicular measures had effects ($P < 0.01$) of season and week as main factors. Compared with spring, rams in summer exhibited higher ($P \leq 0.05$) scrotal circumference and length but lower ($P \leq 0.05$) spermatic cord perimeter across the five weeks. In addition, the testicles of the rams had higher ($P < 0.01$) length, width and volume in summer versus spring season.

Table 7 and Fig. 7 show semen characteristic results. There was a season × week interaction effect ($P \leq 0.03$) only for mass and sperm motility, and abnormal sperm percentage, while season as main fact affected ($P = 0.05$) sperm concentration and viability, but not ejaculate volume ($P = 0.53$). Mass and sperm motility were similar ($P < 0.05$) in summer and spring ejaculates during the first two sampling weeks, but then both seminal parameters were lower ($P < 0.05$) in summer ejaculates compared to spring ejaculates (week 3 to 5). Sperm abnormalities were consistently higher ($P < 0.05$) across the five sampling weeks in summer ejaculates respect to spring ejaculates. Overall, there was lower ($P \leq 0.05$) sperm concentration and viability in summer ejaculated than in those of spring. Finally, the sperm viability showed changes ($P < 0.01$) among sampling weeks, but not ($P \geq 0.21$) sperm concentration and ejaculate volume.

3.2.5. Discussion

The upper limit of the thermoneutral zone for hair sheep is defined at 30 °C (Vicente-Pérez *et al.*, 2020), and HS conditions from a THI= 72 units, which is classified as moderate (≥ 72 to < 74 units), severe (≥ 74 to < 78 units), and extremely severe (≥ 78 units; LPHSI, 1990). Based on the above, Dorper rams in this study were exposed to extremely severe HS during summer ($T_a = \sim 36$ °C and THI=81 units), and thermoneutrality in spring ($T_a = \sim 24$ °C and THI=68 units). Note that air movement in the warm season is an important factor increasing body heat loss in animals, particularly by non-evaporative means in absence of solar radiation; so, an average wind velocity of at least 2.4 m/s is desirable (Mader *et al.*, 1999). Here, the summer wind speed averaged 1.7 m/s, much lower than expected, being a factor that could have compromised the efficiency of the physiological mechanisms to dissipate body

heat load in rams. Despite this, RT results show that rams did not experience hyperthermia in summer or spring.

Unsurprisingly, given some previously published findings in hair breed rams (Kahwage *et al.*, 2018; Pantoja *et al.*, 2017; Moura *et al.*, 2019), high summer Ta caused a significant increase in the core temperature of rams during daylight hours compared to spring, however, the physiological mechanisms of thermoregulation in these sheep acted efficiently to maintain them in normothermia. Thus, Dorper rams had a RT diurnal variation in spring and summer within the reference range (38.3 to 39.9 °C; Al-Dawood *et al.*, 2017). Note that results of Ta circadian rhythm combined with diurnal variations in RR and body surface temperature suggest that Dorper rams avoided hyperthermia in summer due to the joint action of three sequentially activated mechanisms as described for Dorper x Katahdín ram lambs experiencing HS in a desert region (Macías-Cruz *et al.*, 2016; Vicente-Pérez *et al.*, 2020). First, rams took advantage of the nighttime environmental conditions (i.e., absence of solar radiation and decreased Ta) to maximize the loss of body heat gained during the daytime, mainly by non-evaporative means. This is evidenced based on results of physiological variables measured at 06:00 h in summer season, where there was a reduction in RR while the thermal gradient was widened in favor of body surface temperatures (~ 5 °C) with respect to the ambient. Second, rams in sunlight hours continued to lose their body heat load through cutaneous radiation, but also gradually increased their heat losses by evaporative means. Thus, in summer, rams at 12:00 h showed similar thermal gradient (+ 5.5 °C in surface temperatures) but almost three times more RR than in early morning (06:00 h). Finally, the third mechanism was detected when Ta exceeded 40 °C in sunlight hours (18:00 h), given that rams were losing their excessive body heat load essentially by evaporative means (i.e., higher RR and sweating rate) as mean Ta was above surface temperatures in all body region.

Like other body regions, the scrotum of Dorper rams seems to contribute to the dissipation of body heat load to maintain them in normothermia during the summer, making the testicular reproductive function a secondary event. The increase in testicular size combined with decreased thermal gradient between RT and scrotal temperature in sunny summer hours compared to spring, suggests that these rams

under outdoor HS of a desert climate increase testicular blood volume to take advantage of the high scrotal thermoregulatory capacity. The gradual and constant increase in blood flow is positively associated with scrotal circumference and testicle volume (Hedia *et al.*, 2019). A study of yesteryear reported an increase in blood flux from the testicular artery when testis temperature was similar or exceeded body temperature in rams (Setchell, 1998), and more current research conducted in rams (Rizzoto *et al.*, 2019) and bulls (Barros Adwell *et al.*, 2018) has confirmed that testicular hyperthermia leads to increased gonadal blood availability. In fact, arterial blood is considered the main source of testicular heat as T_a increases (Barros Adwell *et al.*, 2018). So, this finding is opposed to that reported commonly for induced hyperthermia effects on testicular size and the paradigm of “blood flow failure” in rams (Marai *et al.*, 2006; van Wettere *et al.*, 2021), meanwhile other studies conducted in outdoor environmental conditions found that summer HS in tropical climate does not alter testicular dimensions in hair breed rams such as Dorper, Santa Ines and Morada Nova (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2012; Kahwage *et al.*, 2017; Moura *et al.*, 2019). The latter, together with our results, show that Dorper rams are more sensitive to summer stress in desert regions than in tropical regions.

Notably, heat-stressed Dorper rams had increased scrotal length and thinned spermatic cord during the summer experimental period, indicating testicular descent in response to high temperatures, as previously reported in other studies (Júnior *et al.*, 2015; Marai *et al.*, 2006). This is a well-known mechanism of testicular thermoregulation in heat-stressed male ruminants, and is possible through relaxation of the cremaster muscle (Barragán Sierra *et al.*, 2021). Despite this effort to maintain temperature of testes below (4-6 °C) the core temperature during summer, rams experienced daily testicular hyperthermia throughout the afternoon (scrotal temperature= 38 to 41 °C vs. RT= 39.7 to 39.9 °C), and consequently a decline in seminal quality in this hot season. Overall, there was a reduction for sperm concentration and viability combined with an increase in the percentage of abnormalities due to HS. Mass and sperm motility also decreased on the last weeks of sampling in summer. Similar deleterious effects have been noted in the semen quality of Dorper rams when their scrotum is insulated with testicle heating bag (Alves *et al.*, 2016; Júnior

et al., 2015). But there are also reports indicating no change or minimal effects on semen characteristics due to summer HS in tropical climates, both in Dorper (Cárdenas-Gallegos *et al.*, 2012; Moura *et al.*, 2019) and in other hair breed rams (Kahwage *et al.*, 2018). Remarkably, overall mean values of the evaluated seminal parameters are within the expected reference range in both seasons (Hafez and Hafez, 2013), so the drop in semen quality due to summer HS is not a factor limiting the fertility of Dorper ram in desert or arid climates.

It is worth noting that the negative effects of HS on production, morphology and functioning of sperm are not reflected immediately in semen quality but are gradual, since the process of spermatogenesis is cyclical and each cycle takes about of 49 days (Barragán Sierra *et al.*, 2021). It is well documented that HS alters spermatogenesis at different points in this biological process and can cause temporary infertility in rams in the medium or long term (Alves *et al.*, 2016), depending on degree of adaptation of the breed and severity of testicular HS (van Wettere *et al.*, 2021). Chronologically, the semen from heat-stressed rams shows an increase in sperm abnormalities to short term due to structural damage to epididymal spermatozoa; then in the medium term, sperm motility decreases, a slight decrease in the number of sperm begins, and sperm morphological abnormalities continue to increase as a result of alterations in spermatocytes and spermatids (higher DNA damage and lipid peroxidation, lower mitochondrial membrane potential and apoptosis); meanwhile in the long term, the negative effects on seminal parameters seminal quality parameters continue to grow, being able to reach a semen with azoospermia under extreme chronic HS (Alves *et al.*, 2016; Júnior *et al.*, 2015; García-Oliveros *et al.*, 2020). Although in our study semen quality was not evaluated at least one complete spermatogenesis cycle, the aforementioned explains the decrease in overall sperm concentration and its motility across the last weeks of the study, as well as the gradual increase in sperm abnormalities due to summer HS.

3.2.6. Conclusions

Desert heat stress conditions moderately reduced the semen quality of Dorper rams by compromising testicular normothermia. Despite this, they were thermotolerant to these environmental conditions by activating physiological thermoregulation mechanisms according to the intensity of thermal stress to maintain homeothermy.

3.2.7. References

- Al-Dawood, A., 2017. Towards heat stress management in small ruminants—a review. *Ann. Anim. Sci.* 17, 59–88.
- Alves, M.B., Andrade, A.F., Arruda, R.P., Batissaco, L., Florez-Rodriguez, S.A., Oliveira, B.M., Torres, M.A., Lanconi, R., Ravagnani, G.M., Prado Filho, R.R., Vellone, V.S., Losano, J.D., Franci, C.R., Nichi, M., Celeghini, E.C., 2016. Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology* 86, 795–805.
- Bailey, T.L., Hudson, R.S., Powe, T.A., Riddell, M.G., Wolfe, D.F., Carson, R.L., 1998. Caliper and ultrasonographic measurements of bovine testicles and a mathematical formula for determining testicular volume and weight in vivo. *Theriogenology* 49, 581–594.
- Barragán Sierra, A., Avendaño-Reyes, L., Hernández, R.J.A., Vicente-Pérez, R., Correa-Calderón, A., Mellado, M., Meza-Herrera, C.A., Macías-Cruz, U., 2021. Thermoregulation and reproductive responses of rams under heat stress. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 12, 910–931.
- Barros Adwell, C.M.Q., Brito, L.F.C., Oba, E., Wilde, R.E., Rizzoto, G., Thundathil, J.C., Kastelic, J.P., 2018. Arterial blood flow is the main source of testicular heat in bulls and higher ambient temperatures significantly increase testicular blood flow. *Theriogenology* 116, 12–16.
- Cárdenas-Gallegos, M.A., Aké-López, J.R., Centurión-Castro, F., Magaña-Monforte, J.G., 2012. The breed and season effects on scrotal circumference and semen

- characteristics of hair sheep rams under tropical conditions. *Reprod. Domest. Anim.* 47, e92–e94.
- De, K., Kumar, D., Balaganur, K., Kumar Saxena, V., Thirumurugan, P., Khursheed Naqvi, S.M., 2017. Effect of thermal exposure on physiological adaptability and seminal attributes of rams under semi-arid environment. *J. Thermal Biol.* 65, 113–118.
- García-Oliveros, L.N., de Arruda, R.P., Batissaco, L., Gonzaga, V.H.G., Nogueira, V.J.M., Florez-Rodriguez, S.A., Almeida, F.d.S., Alves, M.B.R., Pinto, S.C.C., Nichi, M., Losano, J.D.d.A., Kawai, G.K.V., Celeghini, E.C.C., 2020. Heat stress effects on bovine sperm cells: a chronological approach to early findings. *Int. J. Biometeorol.* 64, 1367–1378.
- Hafez, E.S.E., Hafez, B., 2013. *Reproduction in farm animals*, 7th ed. John Wiley & Sons. Pp. 509.
- Hedia, M.G., El-Belely, M.S., Ismail, S.T., Abo El-Maaty, A.M., 2019. Monthly changes in testicular blood flow dynamics and their association with testicular volume, plasma steroid hormones profile and semen characteristics in rams. *Theriogenology* 123, 68–73.
- INEGI, 2017. Anuario estadístico y geográfico de Baja California. From https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/BCN_ANUARIO_PDF.pdf.
- IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115. From <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Júnior, C.A.C, Lucci, C., Peripolli, V., Tanure, C., Ribeiro, L., Barbosa, T., Ramos, A., Louvandini, H., McManus, C., 2015. Laser and thermographic infrared temperatures associated with heat tolerance in adult rams. *Small Ruminant Res.* 132, 86–91.

- Kahwage, P.R., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Junior, W.B., Machado, R., Romanello, N., Passeri, L.F., de Mendonça, K.L., Garcia, A.R., 2018. Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Ruminant Res.* 160, 72–80.
- Kahwage, P.R., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Junior, W.B., Pezzopane, J.R.M., de Andrade Pantoja, M.H., Bosi, C., Miguel, M.C.V., Mahlmeister, K., Garcia, A.R., 2017. High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. *Int. J. Biometeorol.* 61, 1819–1829.
- LPHSI, 1990. Livestock and poultry heat stress Indices. Agriculture Engineering Technology Guide, Clemson University, Clemson, SC, USA.
- Macías-Cruz, U., López-Baca, M. A., Vicente, R., Mejía, A., Álvarez, F. D., Correa-Calderón, A., Meza-Herrera, C. A., Mellado, M., Guerra-Liera, J. E., & Avendaño-Reyes, L., 2016. Effects of seasonal ambient heat stress (spring vs. summer) on physiological and metabolic variables in hair sheep located in an arid region. *Int. J. Biometeorol.* 60(8), 1279–1286.
- Mader, T.L., Dahlquist, J.M., Hahn, G.L., Gaughan, J.B., 1999. Shade and wind barrier effects on summertime feedlot cattle performance. *J. Anim. Sci.* 77, 2065–2072.
- Marai, I.F.M., El-Darawany, A.H.A., Ismail, E.S.A.F., Abdel-Hafez, M.A.M., 2006. Tunica dartos index as a parameter for measurement of adaptability of rams to subtropical conditions of Egypt. *Anim. Sci. J.* 77, 487–494.
- McManus, C.M., Faria, D.A., Lucci, C.M., Louvandini, H., Pereira, S.A., Paiva, S.R., 2020. Heat stress effects on sheep: Are hair sheep more heat resistant? *Theriogenology* 155, 157–167.
- Moura, A.B.B., Brandao, F.Z., Esteves, S.N., de Souza, G.N., da Fonseca, J.F., Pantoja, M.H.A., Romanello, N., Botta, D., Giro, A., Garcia, A.R., 2019. Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology* 123, 123–131.

- NRC, 2007. Nutrient requirements of small ruminants: Sheep, goats, cervids, and new world camelids. Natl. Acad. Press. Washintgton, DC.
- Pantoja, M.H.A., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Pezzopane, J.R.M., Paz, C.C.P., Silva, J., Lourenco Junior, J.B., Brandao, F.Z., Moura, A.B.B., Romanello, N., Botta, D., Garcia, A.R., 2017. Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J. Therm. Biol.* 69, 302–310.
- Rizzoto, G., Hall, C., Tyberg, J.V., Thundathil, J.C., Caulkett, N.A., Kastelic, J.P., 2019. Testicular hyperthermia increases blood flow that maintains aerobic metabolism in rams. *Reprod. Fert. Develop.* 31, 683–688.
- Russel, A.J.F., Doney, J.M., Gunn, R.G., 1969. Subjective assessment of body fat in live sheep. *J. Agri. Sci.* 72, 451–454.
- Setchell, B.P., 1998. The Parkes Lecture. Heat and the testis. *J. Reprod. Fert.* 114, 179–194.
- Theusme, C., Avendaño-Reyes, L., Macías-Cruz, U., Correa-Calderón, A., García-Cueto, R.O., Mellado, M., Vargas-Villamil, L., Vicente-Pérez, A., 2021. Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México. *Sci. Total Environ.* 751, 141779.
- Thorne, J. W., Murdoch, B. M., Freking, B. A., Redden, R. R., Murphy, T. W., Taylor, J. B., & Blackburn, H. D. (2021). Evolution of the sheep industry and genetic research in the United States: opportunities for convergence in the twenty-first century. *Animal genetics*, 52(4), 395–408.
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., Herrero, M., 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Glob. Change Biol.* 27, 5762–5772.
- van Wettere, W.H.E.J., Kind, K.L., Gattford, K.L., Swinbourne, A.M., Leu, S.T., Hayman, P.T., Kelly, J.M., Weaver, A.C., Kleemann, D.O., Walker, S.K., 2021. Review of the impact of heat stress on reproductive performance of sheep. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 12(1), 26.

- Vicente-Pérez, R., Macías-Cruz, U., Avendaño-Reyes, L., Correa-Calderón, A., López-Baca, M.A., Lara-Rivera, A.L., 2020. Heat stress impacts in hair sheep production. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 11, 205–222.
- Villatoro, K.M., Yang, F., Duarte, T., Phillips, C.R., Woerner, D.R., Chao, M.D., Yang, X., 2021. Quality, proximate composition, and sensory characteristics of Dorper, domestic commercial crossbred, and Australian sheep meat: a comparative study. *Transl. Anim. Sci.* 5:txab024.
- Wanjala, G., Astuti, P. K., Bagi, Z., Kichamu, N., Strausz, P., Kusza, S., 2023. Assessing the genomics structure of Dorper and White Dorper variants, and Dorper populations in South Africa and Hungary. *Biology*, 12(3), 386.
- Zlobin, A.S., Volkova, N.A., Borodin, P.M., Aksenovich, T.I., Tsepilov, Y.A., 2019. Recent advances in understanding genetic variants associated with growth, carcass, and meat productivity traits in sheep (*Ovis aries*): An update. *Arch. Anim. Breed.* 62, 579–583.

3.2.8. Tables and figures

Table 4. Climatic (mean \pm SD) conditions during spring and summer in a desert zone.

	Maximum	Minimum	Mean
Spring			
Temperature ($^{\circ}$ C)	32.7 \pm 6.6	13.4 \pm 5.1	23.6 \pm 5.6
Relative humidity (%)	81.0 \pm 16.2	20.0 \pm 11.7	46.6 \pm 16.4
Temperature-humidity index (units)	76.0 \pm 5.5	55.8 \pm 8.7	67.7 \pm 6.5
Wind speed (m/s)	3.4 \pm 1.1	0.1 \pm 0.1	1.4 \pm 0.5
Solar radiation (W/m ²)	842.6 \pm 67.8	0.0 \pm 0.0	269.2 \pm 35.1
Summer			
Temperature ($^{\circ}$ C)	42.6 \pm 2.2	24.4 \pm 3.3	33.6 \pm 1.8
Relative humidity (%)	80.2 \pm 13.3	17.9 \pm 10.3	46.8 \pm 14.0
Temperature-humidity index (units)	86.4 \pm 2.3	73.5 \pm 5.4	81.1 \pm 3.3
Wind speed (m/s)	3.3 \pm 0.8	0.3 \pm 0.5	1.7 \pm 0.6
Solar radiation (W/m ²)	823.9 \pm 62.7	0.0 \pm 0.0	273.2 \pm 26.0

Table 5. Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on respiration rate (RR), rectal temperature (RT) and hair coat temperatures of yearling Dorper rams in desert conditions (mean \pm SEM).

Hours	Spring			Summer			SE	P-value		
	0600	1200	1800	0600	1200	1800		Season	Hour	Interaction
RT (°C)	38.24**	39.01**	39.18**	38.88	39.67	39.91	0.07	<0.01	<0.01	0.64
RR (rpm)	31.40**	93.80**	96.88**	44.12	130.96	149.24	2.19	<0.01	<0.01	<0.01
Hair coat temperature (°C)										
Eye	30.85**	37.37**	36.13**	31.97	42.99	40.05	0.26	<0.01	<0.01	<0.01
Nose	22.99**	36.13**	34.48**	30.98	42.65	40.00	0.44	<0.01	<0.01	0.01
Ear	18.93**	36.28**	34.17**	31.00	42.16	39.46	0.39	<0.01	<0.01	<0.01
Head	24.88**	37.00**	33.84**	29.47	45.53	41.03	0.31	<0.01	<0.01	<0.01
Neck	23.27**	33.61**	33.03**	29.60	44.60	41.55	0.33	<0.01	<0.01	<0.01
Loin	17.65**	36.38**	30.21**	28.69	45.20	40.71	1.69	<0.01	<0.01	0.05
Rump	17.04**	37.20**	30.53**	28.24	46.71	41.89	0.52	<0.01	<0.01	0.27
Leg	19.79**	35.59**	31.59**	29.75	43.87	40.88	0.44	<0.01	<0.01	0.23
Right flank	20.24**	36.79**	31.54**	30.84	45.03	40.78	0.48	<0.01	<0.01	0.11
Ribs	21.76**	35.68**	31.87**	31.38	43.37	39.98	0.37	<0.01	<0.01	0.03
Belly	26.04**	35.68**	34.27**	30.26	42.62	40.42	0.35	<0.01	<0.01	<0.01
Shoulder	22.40**	35.83**	32.42**	31.01	42.64	40.33	0.33	<0.01	<0.01	0.03
Scrotum	26.56**	33.50**	33.20**	29.63	40.83	38.20	0.32	<0.01	<0.01	<0.01

** Differences between spring and summer conditions within the same hour (P < 0.01)

Table 6. Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on the testicular biometry (mean \pm SEM) of yearling Dorper rams in desert conditions.

	Season		SE	P-value		
	Spring	Summer		Season	Week	Interaction
Scrotal length (cm)	12.50	17.04	0.51	<0.01	<0.01	<0.01
Spermatic cord perimeter (cm)	23.89	18.69	0.60	<0.01	0.02	<0.01
Scrotal circumference (cm)	30.19	33.10	0.56	<0.01	0.03	<0.01
Testicle width (cm)	6.30	6.98	0.11	<0.01	0.85	0.11
Testicle length (cm)	9.21	9.90	0.12	<0.01	0.04	0.76
Testicular volume (cm ³)	192.51	255.55	9.23	<0.01	0.30	0.18

Table 7. Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on seminal characteristics of yearling Dorper rams in desert conditions (mean \pm SEM).

	Seasons		SE	P-value		
	Spring	Summer		Season	Week	Interaction
Ejaculate volume (mL)	1.00	0.96	0.05	0.53	0.19	0.60
Sperm concentration ($\times 10^9$ /mL)	5.08	4.20	0.30	0.05	0.21	0.11
Mass motility (0-5)	4.77	3.76	0.40	0.13	0.13	<0.01
Sperm motility (%)	58.16	50.77	6.30	0.45	0.16	0.03
Viability (%)	64.78	46.27	5.88	0.05	<0.01	0.12
Sperm abnormalities (%)	7.84	28.24	4.36	<0.01	<0.01	<0.01

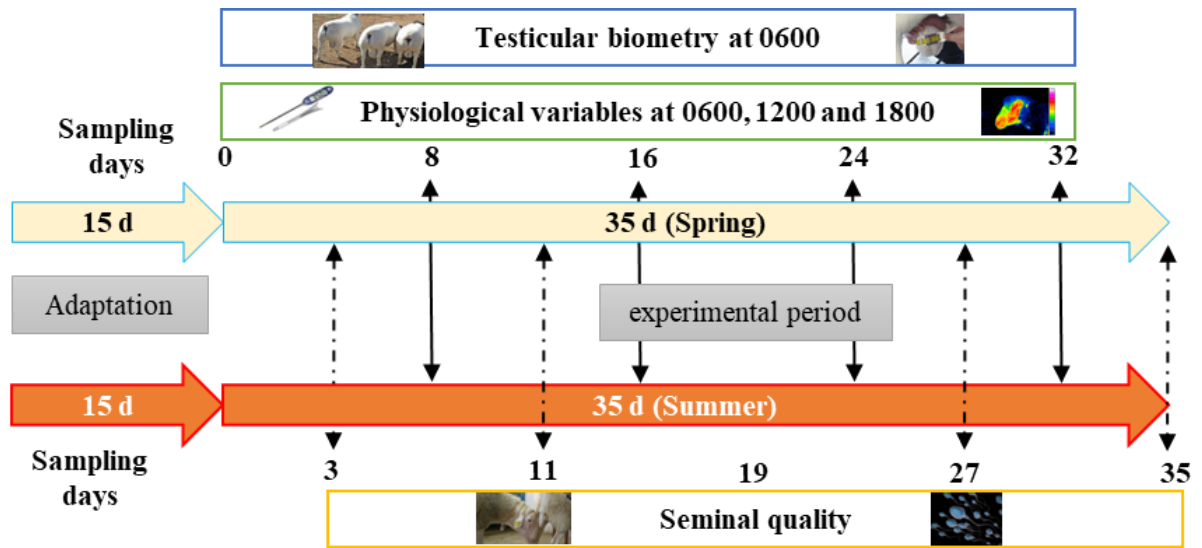


Figure 4. Schematization of sampling and evaluation of study variables.

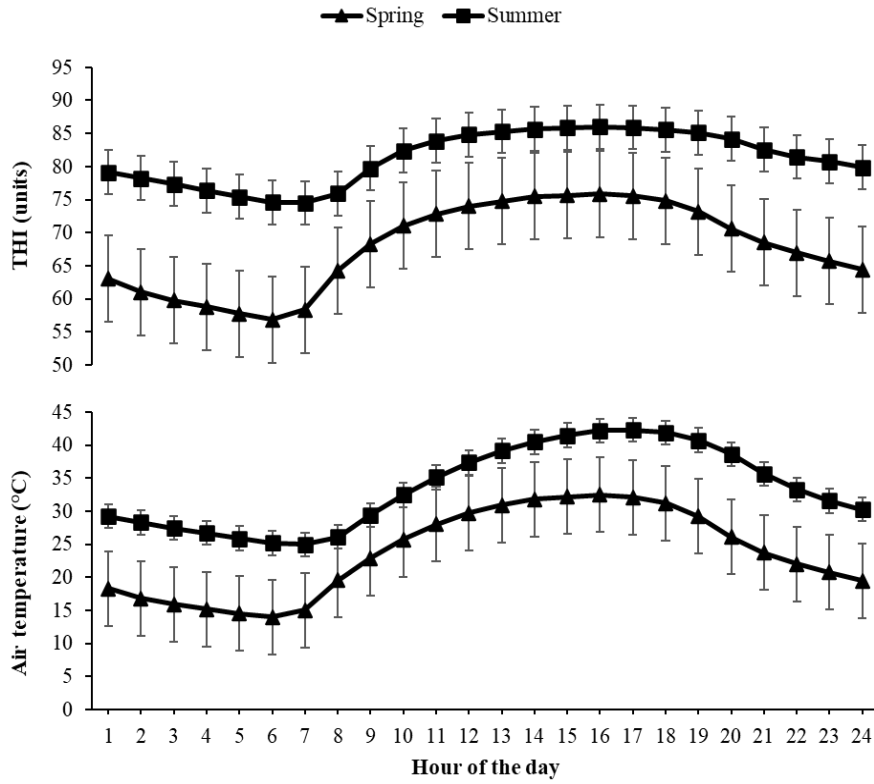


Figure 5. Diurnal patterns of the temperature-humidity index (THI) and air temperature during spring and summer periods (means \pm SD).

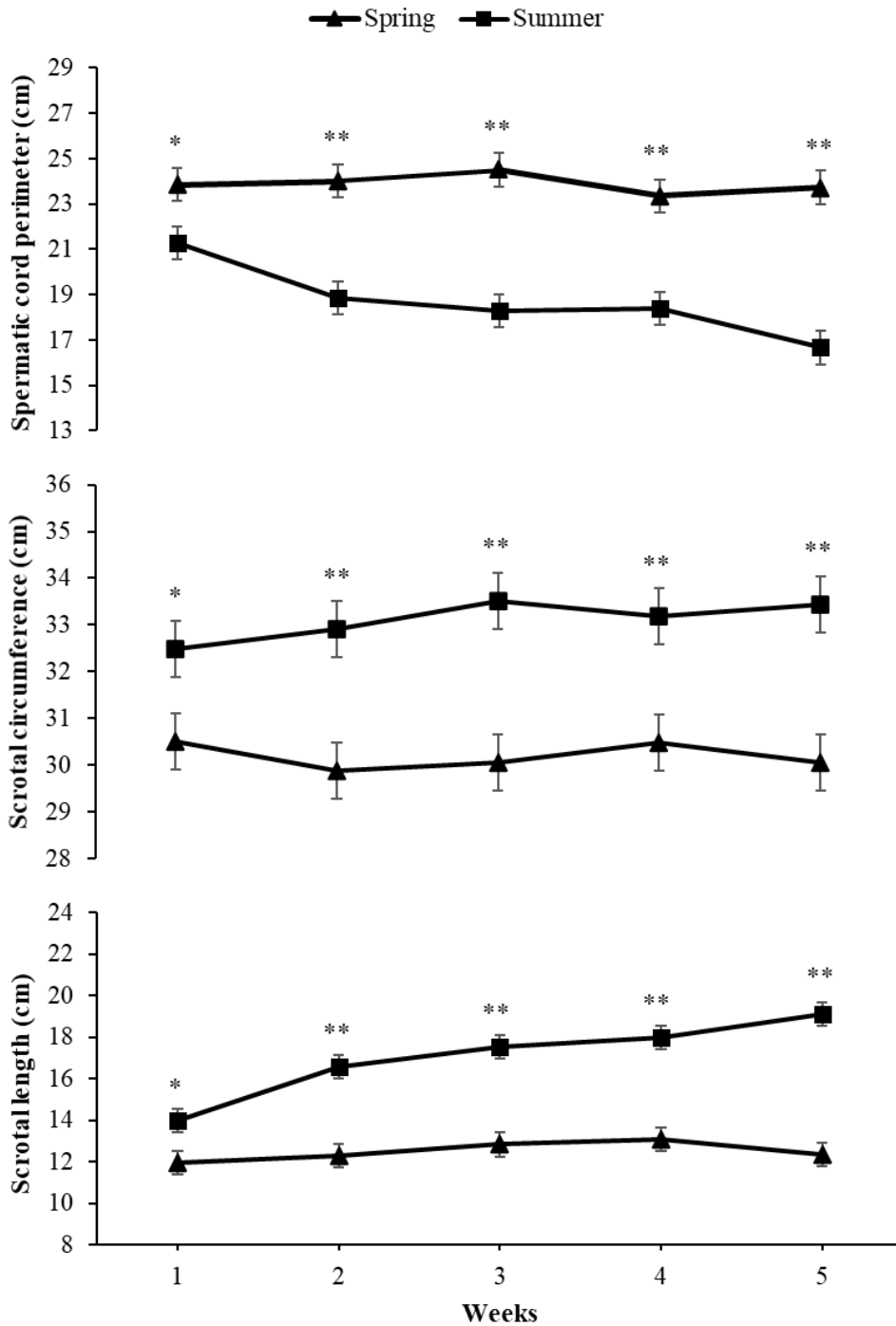


Figure 6. Effects of the season x week interaction on spermatic cord perimeter, scrotal length and scrotal circumference of yearling Dorper rams in desert conditions (** $P < 0.01$ and * $P \leq 0.05$, differences between seasons at each week; $n.s. P > 0.05$, no difference). Data are represented as mean \pm SEM.

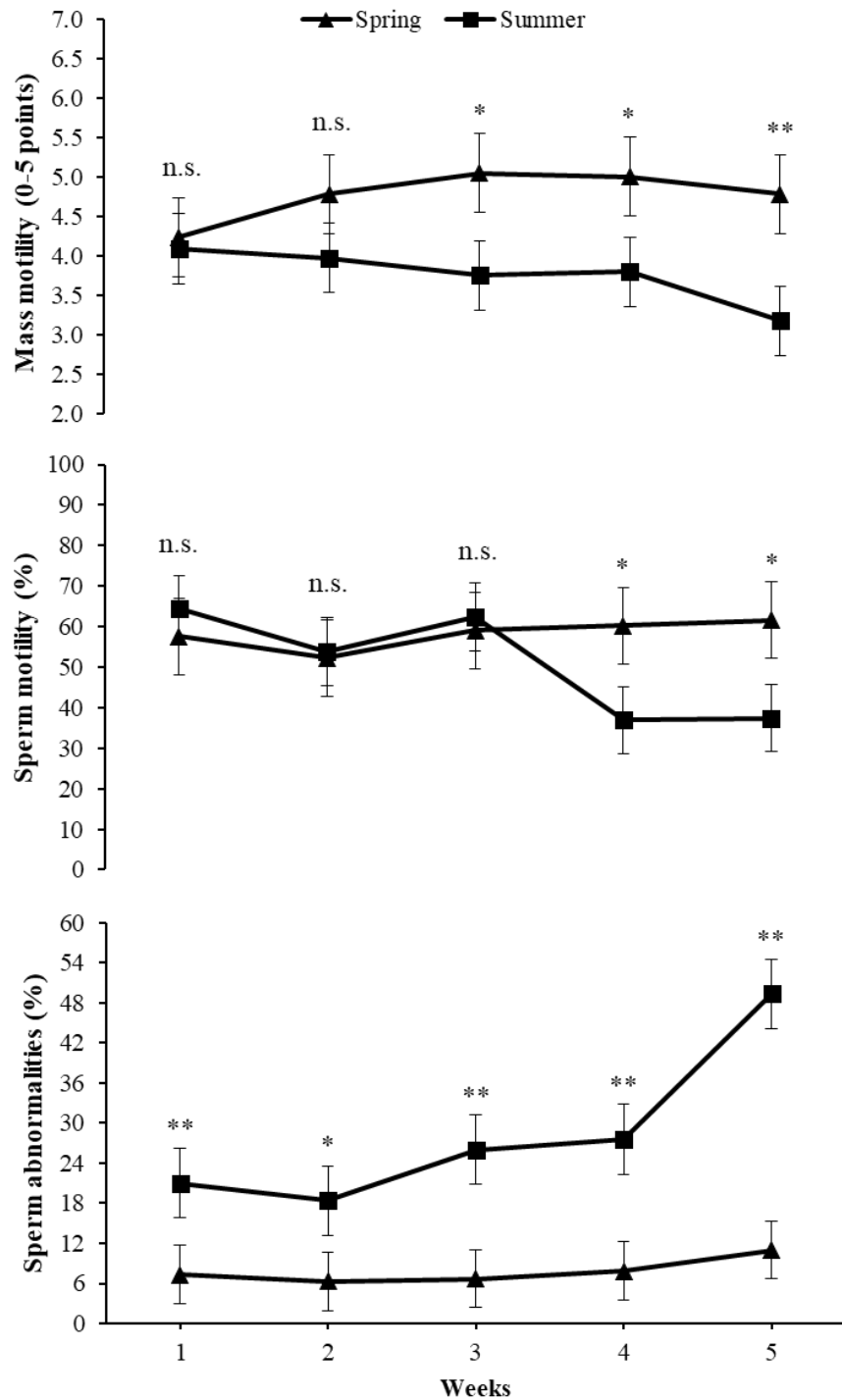


Figure 7. Effects of the season \times week interaction on sperm mass motility, and percentage sperm motility and abnormalities of yearling Dorper rams in desert conditions (** $P < 0.01$ and * $P \leq 0.05$, differences between seasons at each week; n.s. $P > 0.05$, no difference). Data are represented as mean \pm SEM.

CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES GENERALES

Los carneros de raza Dorper muestran una alta tolerancia a las condiciones de estrés por calor (EC) del verano en las regiones desérticas, ya que mantienen la normotermia activando mecanismos fisiológicos de termorregulación secuencialmente a lo largo del día, de acuerdo con las variaciones circadianas del gradiente térmico entre la temperatura central y la ambiental. A pesar de esto, no pueden evitar la hipertermia en los testículos durante las tardes de verano, lo que provoca una reducción moderada en la producción y calidad de los espermatozoides, pero no en el volumen de la eyaculación.

A pesar de las características de resistencia y rusticidad natural que poseen los ovinos, el EC provoca en el carnero Dorper una serie de cambios fisiológicos y metabólicos que no podemos ignorar, ya que pueden modificar el balance energético y hormonal reproductivo, lo que finalmente repercute en forma negativa en las concentraciones sanguíneas de testosterona y, por ende, en la calidad seminal y conducta sexual. Aunado a esto, la hipertermia testicular ocasiona daños directos a los espermatozoides, lo que puede disminuir su capacidad fecundante. Por lo tanto, es importante el uso de estrategias de mitigación del EC en carneros para mantener el bienestar y la fertilidad en el rebaño.

APÉNDICE. PUBLICACIONES

<https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i3.5624>

Revisión bibliográfica

Termorregulación y respuestas reproductivas de carneros bajo estrés por calor. Revisión

Alejandra Barragán Sierra ^a

Leonel Avendaño-Reyes ^a

Juan A. Hernández Rivera ^b

Ricardo Vicente-Pérez ^c

Abelardo Correa-Calderón ^a

Miguel Mellado ^d

Cesar A. Meza-Herrera ^e

Ulises Macías-Cruz ^{a,*}

^a Universidad Autónoma de Baja California. Instituto de Ciencias Agrícolas, Valle de Mexicali, Baja California, México.

^b Universidad de Colima. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Tecomán, Colima, México.

^c Universidad de Guadalajara. Departamento de Producción Agrícola, CUCSUR, Autlán de Navarro, Jalisco, México.

^d Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Nutrición, Saltillo, Coahuila, México.

^e Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Durango, México.

*Autor de correspondencia: umacias@uabc.edu.mx, ulisesmacias1988@hotmail.com

Resumen:

Las temperaturas elevadas registradas durante la época de verano en las regiones cálidas comprometen la capacidad reproductiva de los animales domésticos. En carneros, el estrés por calor (EC) causa en el organismo una serie de ajustes fisiológicos, metabólicos, endocrinos y moleculares con el objeto de mantener normotermia y sobrevivir; sin embargo, varios de estos cambios se asocian negativamente con su fertilidad, principalmente los endocrinos. El EC en carneros provoca una disminución en las concentraciones sanguíneas de testosterona a través de diferentes mecanismos, y esto se refleja negativamente en el proceso de espermatogénesis y en la conducta sexual. En consecuencia, los carneros estresados por calor presentan baja calidad seminal y apetito sexual; a nivel de espermatozoides se ha observado daño estructural y en el ADN. Dada esta situación, se recomienda el uso de estrategias de mitigación del EC durante el verano en las explotaciones ovinas de regiones cálidas, tales como el uso de sombras en corrales, la administración de antioxidantes o modificaciones en la alimentación. Por lo tanto, el objetivo de este documento es revisar el conocimiento actual en relación al efecto del EC sobre la capacidad de termorregulación y reproductiva de los carneros, así como la aplicación de estrategias para su mitigación.

Palabras clave: Semental, Macho ovino, Apetito sexual, Calidad seminal, Daño espermático.

Recibido: 18/02/2020

Aceptado: 28/09/2020

Introducción

Las regiones con climas calientes se caracterizan por presentar temperaturas ambientales (T_a) y humedades relativas (HR) elevadas en verano, que generalmente sobrepasan el límite superior de la zona termoneutral de los animales de producción ($\leq 30\text{ }^\circ\text{C}$), ocasionándoles la presencia de condiciones ambientales de estrés por calor (EC)^(1,2). El impacto productivo y reproductivo que genera el EC en los animales varía entre especies, siendo los pequeños rumiantes quienes mejor adaptación muestran a estas condiciones ambientales⁽³⁾. Algunas revisiones han descrito los mecanismos de termorregulación empleados por los ovinos para evitar hipotermia bajo EC^(1,2,4,5), pero poca atención se pone respecto al efecto que tiene en la reproducción del carnero. En climas cálidos, el éxito reproductivo del rebaño depende en gran medida de la adaptación y el correcto funcionamiento reproductivo de los sementales.

El organismo de los carneros estresados por calor presenta una serie de cambios para evitar hipertermia^(1,6-8). Así, la capacidad reproductiva de los carneros disminuye mientras hacen esfuerzos fisiológicos, metabólicos y endocrinológicos para mantenerse en normotermia^(3,7,9-11). El EC puede afectar negativamente la reproducción del carnero por diferentes mecanismos, siendo los principales: 1) disminución en las concentraciones de testosterona, y 2) daño directo en la morfometría y contenido de material genético del espermatozoide^(12,13). Esto se refleja en fallas en el proceso de espermatogénesis, así como en baja calidad seminal, conducta reproductiva y fertilidad^(7,14-16). No obstante, la aplicación de estrategias de mitigación del EC mejora la capacidad reproductiva del carnero en estas condiciones climáticas^(1,8,17).

Cabe mencionar que los resultados de los efectos de EC en la reproducción del carnero no son consistentes a través de los estudios. Diferencias entre razas a nivel de adaptación a EC explican en gran medida estas discrepancias⁽³⁾. Por lo tanto, la presente revisión tiene como objetivo describir el conocimiento actual en relación al efecto del EC en la capacidad de termorregulación y reproductiva de los carneros, así como la aplicación de estrategias para su mitigación.

Ovinos en climas cálidos

En las últimas décadas, la acumulación excesiva de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera está provocado un aumento en la Ta de la superficie terrestre⁽¹⁾, por lo cual el cambio climático a nivel mundial es eminente, principalmente con tendencias a promover una mayor presencia de climas cálidos y, consecuentemente, la desertificación de más regiones del globo terrestre⁽¹⁾. Las condiciones ambientales donde predominan Ta elevadas causan que los ovinos, así como cualquier otro animal de producción, experimenten EC⁽²⁾, lo que representa para el organismo un desafío fisiológico-metabólico para mantenerse en condiciones de homeotermia⁽⁶⁾.

En la búsqueda de estrategias que ayuden a mantener la producción de alimentos de origen animal bajo este escenario climático adverso, algunos autores proponen la producción de ovinos como una alternativa^(1,10,18), principalmente debido a que son capaces de mantener su desempeño productivo bajo condiciones de EC⁽³⁾. Entre las características de adaptabilidad que poseen los ovinos se incluyen resistencia a parásitos, enfermedades y escasez de agua para consumo^(15,19); también capacidad para aprovechar forrajes y esquilmos agrícolas de mala calidad, y el mantenimiento de la capacidad reproductiva del rebaño y el crecimiento de los corderos bajo escenarios de EC^(1,3,5). Cabe mencionar que el nivel de adaptación de los ovinos varía ampliamente entre razas, ya que existe una gran diversidad de ellas que fueron desarrolladas desde condiciones climáticas de frío hasta cálidas.

Estrés por calor y la producción ovina

El estrés se genera por la presencia de un evento externo que causa alteraciones en un sistema biológico⁽²⁰⁾. En animales de producción se considera que hay estrés cuando algún factor externo altera su salud, metabolismo basal y capacidad productiva⁽³⁾. En este sentido, los ovinos pueden desarrollar signos de estrés por enfrentarse a cambios drásticos en las condiciones climáticas, y de hecho, desarrollan EC cuando la combinación de factores ambientales provocan un incremento en la Ta por arriba del límite superior de su zona termoneutral⁽¹⁾.

Las variables climáticas que pueden promover el ambiente de EC son Ta, HR, radiación solar, velocidad del viento y precipitación; no obstante, la Ta y la HR son los principales factores asociados con la presencia de EC⁽⁵⁾, y en consecuencia, ambos son usados para construir el índice de temperatura-humedad ($ITH = Ta - [(0.31 - 0.31 * HR)(Ta - 14.4)]$)⁽⁴⁾. Cabe aclarar que este índice no se desarrolló para ovinos, sin embargo, en la actualidad es ampliamente usado para definir el grado de EC en esta especie, ya que a la fecha no existe uno específico para ellos. Basado en ese ITH, se considera que los ovinos comienzan a experimentar EC a las 22.2 unidades, siendo de tipo moderado entre 22.2 y <23.3 unidades, severo entre 23.3 y <25.6 unidades, y severo extremo a ≥ 25.6 unidades⁽⁴⁾.

La zona termoneutral para la mayoría de las razas ovinas se encuentra entre los 5 y 25 °C⁽¹⁾, sin embargo, hay razas adaptadas que comienzan a experimentar EC por encima de los 30 °C^(5,15). Esto sugiere que, a pesar de ser homeotermos, la tolerancia de los ovinos al EC varía ampliamente entre razas, y estudios específicos para cada raza deben realizarse para evaluar su tolerancia a Ta altas. En el mundo, existen más de 1,000 razas de ovinos, las cuales varían en su capacidad de termorregulación en ambientes de hipertermia, y esto obedece a su origen climático⁽³⁾. En México, se cuenta tanto con razas de lana y de pelo, pero estas últimas son más tolerantes al EC, dado que se originaron en climas cálidos, mientras que las de lana se originaron en climas fríos o templados⁽⁵⁾. Esto no significa que no haya razas de lana tolerantes al EC en otros países; en Australia, la raza Merino muestra gran capacidad de adaptación a regiones cálidas⁽¹⁾.

La respuesta termorregulatoria de los ovinos al EC también varía con el sexo, y dentro del sexo con la edad, estado fisiológico y actividad reproductiva^(5,21). Mientras que los efectos negativos de EC son más notorios en crías y ovejas gestantes y lactando^(21,22), en carneros parecen ser menos perceptibles ya que su producción de calor metabólico es bajo comparado con las ovejas, y más cuando se encuentran en descanso reproductivo⁽¹⁾. Esto último podría ser la causa de que la mayoría de estudios se desarrollen en ovejas, y consideren poco relevante el tema para investigar en carneros. No obstante, los procesos reproductivos testiculares son muy sensibles a cambios en la Ta, lo cual se asocia con baja fertilidad en los

carneros en épocas cálidas. En este sentido, el resto de la revisión de literatura se centrará en analizar los efectos del EC en la reproducción del carnero.

Estrés por calor y termorregulación del carnero

La termorregulación de los carneros bajo condiciones termoneutrales se da esencialmente por la activación de mecanismos no evaporativos, sin que esto implique alteraciones metabólicas, endocrinas o en el requerimiento extra de energía de mantenimiento^(1,3). Sin embargo, en condiciones de EC, los carneros activan una serie de mecanismos de termorregulación que favorecen la homeotermia frente al desafío térmico.

El EC en regiones cálidas aumenta los valores promedio de las variables fisiológicas, tales como temperatura rectal (TR), frecuencia respiratoria (FR), frecuencia cardíaca y tasa de sudoración (Cuadro 1)^(10,18,23). Así, los carneros mantienen su normotermia, aunque resulta importante señalar que el aumento en el número de respiraciones es el principal mecanismo usado por los carneros para perder la carga de calor corporal⁽²¹⁾. De hecho, los ovinos bajo EC pueden eliminar entre 60 y 90 % de la carga térmica a través del aparato respiratorio⁽⁴⁾. Otro mecanismo fisiológico activado, el cual es más evidente en carneros de raza de pelo sujetos a EC, es la redistribución del flujo sanguíneo hacia tejidos periféricos para disipar el calor corporal por radiación a través de la piel^(5,15). Conforme el gradiente de temperaturas entre la piel y el ambiente disminuye, la FR incrementa hasta convertirse en la principal vía de disipación de calor corporal⁽²⁴⁾.

Cuadro 1: Cambios en las variables fisiológicas de carneros estresados por calor

Fuente	Raza	Tratamiento / época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(52)	Suffolk	Invierno	14.5	↑ TR, TE
		Verano	28.2	
(45)	Najdi	Invierno	19.8 ± 0.4	↑ TR, FR y FC
		Verano	38.4 ± 0.3	
(72)	Malpura	Invierno	7.0 - 25.5	↑ FR y FC
		Verano	23.0 - 40.0	
(15)	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ TR, FC y TS
		Verano	~ 18.0 - 32.0	
	Morada Nova	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ TR, FC y TS
		Verano	~ 18.0 - 32.0	
(73)	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 27.0	Sin cambios
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
	Morada Nova	Invierno	~ 12.5 - 27.0	↓ FR y ↑ TMT

		Verano	~ 19.0 - 31.0	
	Texel	Invierno	~ 12.5 - 27.0	Sin cambios
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
	Dorper	Invierno	~ 12.5 - 27.0	↓ FR y ↑ TMT
		Verano	~ 19.0 - 31.0	
(18)	Han de cola pequeña	Termoneutral	~ 22.0 - 23.0	
		Estrés por calor	~ 30.0 - 35.0	↑ FR
(74)	Merino polaco	Termoneutral	16.5 ± 1.0	
		Estrés por calor	50.0 ± 1.0	↑ TR y FR
(10)	Merino	Termoneutral	20.1 - 20.9	↑ FR y FC
		Estrés por calor	28.6 - 30.6	
(24)	Malpura x Malpura x Garole	Termoneutral	33.6 ± 0.7	
		Estrés por calor	44.2 ± 0.2	↑ TR y FR

TR= temperatura rectal, FR= frecuencia respiratoria, FC= frecuencia cardíaca, TE= temperatura escrotal, TMT= temperatura media testicular; TS= tasa de sudoración.

En carneros, el escroto funciona como un órgano de termorregulación tanto en condiciones termoneutrales como de EC⁽¹⁾. En condiciones ambientales cálidas de verano, el escroto es una de las regiones corporales que más disipa carga de calor debido a la gran vascularización (plexo pampiniforme) que hay en la superficie testicular, y a la gran cantidad de glándulas sudoríparas^(15,16). Existe una alta correlación entre la temperatura interna corporal y la temperatura escrotal, por lo que conocer la variabilidad de la temperatura escrotal permite evaluar la eficiencia de termorregulación del carnero⁽¹⁵⁾.

La activación de los mecanismos evaporativos demanda una gran cantidad de agua corporal, por lo que el consumo de agua puede aumentar entre 19 y 25 % en los carneros durante el verano⁽²⁵⁾. Esto trae como consecuencia que el consumo de alimento se reduzca por un efecto sustitutivo⁽²⁶⁾. Sin embargo, en ovinos de pelo se demostró que el consumo de alimento se mantuvo similar en verano y primavera, independientemente del aumento en el consumo de agua registrado durante verano⁽⁵⁾. Esto sugiere que el efecto sustitutivo del consumo de agua por consumo de alimento se presenta principalmente en carneros con menos tolerancia al EC. Así, la reducción en el consumo de alimento es el resultado del esfuerzo del carnero para reducir la producción de calor endógeno, al suprimir parcialmente la actividad metabólica y ruminal^(1,4,27).

Todos los ajustes fisiológicos que presentan los carneros producto del EC causan un aumento en los requerimientos de energía de mantenimiento, mientras que la reducción en el consumo

de alimento altera la disponibilidad de la misma⁽⁵⁾. En consecuencia, las Ta altas de verano alteran el metabolismo de los carneros, en primera instancia para distribuir energía a los procesos de termorregulación, y en segunda para reducir la producción de calor endógeno, al mismo tiempo que hacen más eficiente el uso de los sustratos energéticos^(28,29). No obstante, los resultados del efecto del EC en las concentraciones séricas de metabolitos y hormonas metabólicas no son consistentes entre los estudios (Cuadro 2).

Cuadro 2: Cambios en los metabolitos sanguíneos de carneros estresados por calor

Fuente	Raza	Tratamiento / época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(44)	Ossimi	Invierno	24.1	↑ GLU
		Verano	33.7	↓ COL y LIPT
(45)	Najdi	Invierno	19.8 ± 0.4	↑ GLU y PROT
		Verano	38.3 ± 0.3	
(24)	Malpura Malpura Garole	x Termoneutral	33.6 ± 0.7	↓ PROT y T ₃ ↑ COR
		x Estrés por calor	44.2 ± 0.2	
(10)	Merino	Termoneutral	20.1 - 20.9	↑ COR
		Estrés por calor	28.6 - 30.6	
(25)	Iraní fat-tailed	Termoneutral	21.0	↓ GLU, TRIG, T ₃ y T ₄ ↑ PROT y COR
		Estrés por calor	40.0	
(74)	Merino polaco	Termoneutral	16.5 ± 1.0	↓ GLU ↑ COR
		Estrés por calor	50.0 ± 1.0	
(18)	Han de cola pequeña	Termoneutral	~ 22.0 - 23.0	↓ TRIG, PROT
		Estrés por calor	~ 30.0 - 35.0	

GLU= glucosa, COL= colesterol, TRIG= triglicéridos, PROT= proteína total, LIPT= lípidos totales, COR= cortisol, T₃= triyodotironina, T₄= tiroxina.

La elevada FR observada en carneros estresados por calor, demanda una excesiva cantidad de glucosa como fuente de energía para el funcionamiento de los músculos del aparato respiratorio⁽³⁾. Por consiguiente, los carneros en verano incrementan las concentraciones

sanguíneas de glucosa comparado con épocas termoneutrales, lo cual se debe a que las concentraciones de cortisol también aumentan en respuesta al EC^(1,3). El cortisol promueve la gluconeogénesis y glucólisis hepática⁽²⁸⁾. De acuerdo con esto, carneros de raza Ossimi⁽³⁰⁾ y Najdi⁽³¹⁾ registraron mayores concentraciones sanguíneas de cortisol y glucosa en verano que en invierno. Sin embargo, hay estudios donde las concentraciones séricas de glucosa disminuyeron^(18,32) o no cambiaron^(10,23) por efecto del EC en carneros. Esto podría estar asociado con un aumento en las concentraciones de insulina plasmática⁽²⁸⁾.

En los ovinos expuestos a condiciones de EC crónico, principalmente los de razas adaptadas a climas cálidos, aumentan las concentraciones sanguíneas de insulina como un mecanismo adaptativo para mantener un correcto funcionamiento metabólico, mejorar la eficiencia en el uso de energía y reducir el catabolismo de tejido graso^(28,29). Particularmente, los niveles altos de insulina permiten a los carneros estresados por calor: 1) evitar la apoptosis de las células β pancreáticas por un aumento en la producción de ácidos grasos no esterificados; 2) promover el consumo celular de glucosa circulante para su metabolismo; y 3) mantener anabolismo y evitar catabolismo, principalmente de tejido graso^(3,28). Este último punto ha sido asociado con la disminución en las concentraciones séricas de triglicéridos, colesterol y lípidos totales en carneros sometidos a EC crónico^(18,30). Adicionalmente, una reducción en las concentraciones sanguíneas de dichos metabolitos lipídicos, está asociada parcialmente con la movilización de ácidos grasos para cubrir los requerimientos de energía cuando el sistema ahorrador de glucosa se activa^(1,28). Macías-Cruz *et al*⁽³³⁾ mencionan que, en ovinos, las concentraciones séricas de glucosa, colesterol, triglicéridos, proteína total y urea varían de acuerdo al tipo de EC. Un EC crónico reduce las concentraciones séricas de los metabolitos asociados al metabolismo energético (glucosa, colesterol y triglicérido), pero aumenta las concentraciones de los metabolitos asociados con el metabolismo de proteína (proteína total y urea). En el caso de EC agudo, las variaciones en las concentraciones sanguíneas de esos metabolitos muestran un efecto contrario al observado en EC crónico, lo cual obedece a que el metabolismo de energía cambia para garantizar una mayor disponibilidad de sustratos energéticos al momento de hacer los ajustes fisiológicos⁽³⁾.

Finalmente, la glándula tiroidea también juega un rol importante en la termorregulación de todas las especies, incluyendo los carneros^(1,3). El EC causa una reducción en la liberación de hormonas tiroideas, lo cual favorece una menor producción de calor metabólico y carga de calor corporal^(23,32). Notoriamente, la triyodotironina tiene una vida media más corta y es más termo-sensible que la tiroxina, tal como se demostró en un estudio de carneros de raza Malpura⁽²³⁾.

Estrés por calor y endocrinología reproductiva del carnero

Los factores ambientales juegan un rol importante en el control de la capacidad reproductiva de los carneros. Un ambiente inadecuado puede causar un estrés al carnero y esto desencadenar alteraciones en la función neuroendocrina del eje reproductivo⁽³⁴⁾. En regiones cálidas, las Ta altas de verano generan un ambiente de EC para los carneros, conduciéndolos a que prioricen las actividades asociadas a los procesos de termorregulación en lugar de las funciones reproductivas⁽¹³⁾. De hecho, su capacidad reproductiva podría ser inhibida totalmente en razas susceptibles al EC, mientras que dicha inhibición podría ser parcial o inexistente en razas adaptadas^(1,15,23).

Los carneros, en repuesta a las condiciones de EC, activan el sistema simpático adreno-medular (SAM) y el eje hipotálamo-hipófisis-adrenal (HHA)⁽¹²⁾. El SAM estimula la liberación de catecolaminas (adrenalina y noradrenalina) en la médula de las glándulas adrenales⁽⁹⁾, las cuales inducen una vasodilatación periférica e incrementan la disponibilidad de energía por medio de la gluconeogénesis y lipólisis^(1,13). Por su parte, el eje HHA comienza su activación con la secreción hipotalámica de las hormonas liberadoras de corticotropinas (CRH), quienes a su vez estimulan la secreción de la hormona adrenocorticotrópica (ACTH) en la adenohipófisis^(12,13,17). Adicionalmente, las catecolaminas junto con las CRH provocan la liberación hipotalámica de la β -endorfina, cuyo precursor es el polipéptido proopiomelanocortina, el cual también es precursor de la ACTH^(17,34). La ACTH vía endocrina estimula la síntesis de glucocorticoides (cortisol y corticosterona) y mineralocorticoide (aldosterona) en la corteza adrenal a partir del colesterol^(13,17,32). La liberación de cortisol es el principal mecanismo a través del cual el eje HHA inhibe el funcionamiento del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal (HHG)^(9,11), y consecuentemente, el grado de actividad reproductiva en los carneros expuestos a EC⁽³⁴⁾.

Los niveles de actividad de los ejes HHA y HHG se relacionan negativamente, de tal manera que comúnmente se observa una disminución en las concentraciones de testosterona y, en consecuencia, en la actividad reproductiva de los carneros en ambientes cálidos⁽¹⁾. El aumento de cortisol en sangre causa que los niveles de testosterona disponible en los túbulos seminíferos disminuyan, lo cual a su vez reduce la producción y calidad de espermatozoides por una baja actividad en el proceso de espermatogénesis^(35,36). Asimismo, las bajas concentraciones de testosterona causan que los carneros presenten libido y capacidad de monta reducida⁽³⁷⁻³⁹⁾.

La testosterona es sintetizada y liberada por las células testiculares de Leydig, las cuales responden al estímulo de la hormona luteinizante (LH) para dicha acción^(9,40). Por su parte, las células de Sertoli, en respuesta a los estímulos de la hormona foliculo estimulante (FSH), sintetizan y liberan la proteína ligadora de andrógenos, quien es responsable de unirse con la

testosterona circulante para introducirla a los túbulos seminíferos⁽⁴⁰⁾. Una vez adentro de los túbulos seminíferos, la testosterona se encarga de sincronizar todo el proceso de espermatogénesis⁽¹²⁾. Sin embargo, la activación del eje HHA en respuesta al EC puede comprometer negativamente el funcionamiento correcto de este mecanismo en diferentes puntos. Se ha documentado ampliamente que el cortisol genera una retroalimentación negativa sobre GnRH a nivel hipotálamo^(1,34), situación que a su vez evita que la adenohipófisis sintetice y libere las hormonas gonadotropinas (FSH y LH)^(12,13); ambas esenciales para garantizar la presencia de concentraciones suficientes de testosterona dentro de los túbulos seminíferos, para llevar a cabo la espermatogénesis. Algunos estudios también señalan que las concentraciones de testosterona pueden disminuir por otros mecanismos que no necesariamente están asociados con el funcionamiento del hipotálamo y la hipófisis en carneros sujetos a EC^(9,12,41).

Las concentraciones de testosterona pueden disminuir debido a que los glucocorticoides reducen la expresión de receptores para LH en las células de Leydig⁽⁴¹⁻⁴³⁾. También se ha reportado que las células de Leydig requieren de ciertas citoquinas como las IL-1 y IL-6 para la liberación de testosterona, sin embargo, un aumento en la síntesis de glucocorticoides mostró disminuir la respuesta inmune y, por ende, la producción de dichas citoquinas^(12,44). Otras evidencias señalan que la producción de la proteína ligadora de andrógenos en las células de Sertoli puede disminuir por una baja producción de hormonas tiroideas^(22,45). En forma similar, por efecto directo de una hipertermia testicular, las células germinales pueden dañarse, así como afectarse negativamente la expresión de la proteína Conexina-43, encargada de la unión entre las células de Sertoli⁽⁴⁶⁾. Estas alteraciones a nivel de células de Sertoli podrían conducir a una baja disponibilidad de testosterona dentro de los túbulos seminíferos⁽¹²⁾. Cabe mencionar que algunos de esos estudios no fueron hechos en carneros, por lo que pueden ser motivo de futuras líneas de investigación.

Estrés por calor y capacidad reproductiva del carnero

Efectos en la calidad seminal

La calidad seminal en los carneros disminuye bajo condiciones de EC debido a la activación de los mecanismos neuroendocrinos, fisiológicos y metabólicos, así como al aumento en el gasto energético de mantenimiento para conservar condiciones de normotermia⁽¹⁾. Generalmente, los daños ocasionados en los espermatozoides por EC se vuelven visibles entre los 14 y 21 días posteriores al inicio de la exposición de los carneros a Ta altas⁽⁴⁷⁾, por consiguiente, se detecta hasta entonces una disminución en la calidad seminal.

Las características seminales principalmente afectadas son motilidad progresiva, anomalías espermáticas, integridad de la membrana plasmática, concentración

espermática y volumen del eyaculado (Cuadro 3)^(1,48). La motilidad progresiva y masal disminuyen entre un 5 y 25 %^(49,50), lo cual se asocia con un aumento en el porcentaje de espermatozoides anormales⁽¹⁶⁾. Las anomalías espermáticas que predominan debido al EC son los defectos en cabeza y acrosomales⁽⁵¹⁾. Cabe mencionar que dichas anomalías son menos frecuentes en los sementales de razas autóctonas de regiones cálidas, de tal manera que estas razas adaptadas a EC presentan entre 1 y 5 % de espermatozoides anormales^(49,52).

Cuadro 3: Cambios en las características seminales de carneros estresados por calor

Fuente	Raza	Tratamiento época	Temperatura del aire (°C)	Hallazgos durante la época/tratamiento con mayor temperatura
(49)	Chios	Otoño	9.7 - 18.3	↓ MOT y CON
		Verano	19.1 - 30.6	↑ SA
	Friesian	Otoño	9.7 - 18.3	↓ MOT y CON
		Verano	19.1 - 30.6	↑ MP y SA
(54)	Persian	Invierno	5.8 ± 3.8	↓ VOL
	Karakul	Verano	26.0 ± 4.8	↑ VIT y TES
(52)	Suffolk	Invierno	14.5	↓ CE, MM, VIT y CON
		Verano	28.2	↑ pH seminal, SA y daño acrosomal
(55)	Hamari (no esquilados)	Invierno	14.1 - 32.4	↓ VOL, VIT, MM y PM
		Verano	22.9 - 43.3	↑ SA
	Hamari (esquilados)	Invierno	14.1 - 32.4	↓ VOL, MM y VIT
		Verano	22.9 - 43.3	↑ SA
(50)	Dorper	Invierno	18.0 - 26.0	↓ CE, CON, MM y PM
		Verano	26.0 - 32.0	↑ SA
(27)	Zulu	Invierno	23.3	↓ VOL, CON e PMI
		Verano	28.3	↑ CE
(15)	Morada Nova	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↑ CON y SAS
		Verano	~ 18.0 - 32.0	
	Santa Inés	Invierno	~ 12.5 - 28.0	↓ PMI
		Verano	~ 18.0 - 32.0	↑ CON
(14)	Pelibuey	Invierno	--	↓ CE y CON
		Otoño	26.0 - 27.8	↑ SA
(56)	Ouled Djellal	Primavera	--	↓ CE, VIT y TES
		Verano	33.0 - 40.0	
(53)	Malpura	Termoneutral	--	↓ CE, VOL, MM, CON y TES
		Estrés por calor	42.0	
(24)		Termoneutral	33.6 ± 0.7	↓ MOT

Malpura	x	Estrés por calor	44.2 ± 0.2
Malpura	x		
Garole			

CE= circunferencia escrotal, MOT= motilidad espermática, MM= motilidad masal, MP= motilidad progresiva, CON= concentración espermática, VOL= volumen de eyaculado, VIT= vitalidad espermática, PMI= integridad de membrana plasmática, AE= anomalidades espermáticas, AES= anomalidades espermáticas secundarias, TES= testosterona sérica.

El perímetro escrotal y la concentración espermática también han mostrado disminuir por efecto del EC⁽¹⁶⁾, lo cual posiblemente esté relacionado con una menor proliferación de células espermáticas y una mayor apoptosis de células del parénquima testicular⁽⁴⁷⁾. Algunos estudios señalan una disminución de 2 a 7 cm en el perímetro escrotal y de 3,000 millones de espermatozoides por mililitro de eyaculado, tras someter a los carneros a condiciones de EC^(52,53).

Por otra parte, la actividad secretora de las glándulas accesorias disminuye en carneros sujetos a EC, lo cual directamente se refleja en menor volumen de eyaculado^(36,53-55). La menor secreción de plasma seminal en las glándulas accesorias se debe a una disminución en las concentraciones séricas de testosterona en carneros expuestos a EC^(12,56). Adicionalmente, la composición del plasma seminal se modifica, principalmente a nivel de las concentraciones de electrolitos y proteínas, compuestos que mantienen el pH seminal entre neutro y ligeramente alcalino (7.0 a 7.3)⁽¹¹⁾. En general, el EC incrementa el pH seminal de los carneros^(52,57), lo cual reduce el número de espermatozoides por eyaculado y aumenta el porcentaje de anomalidades⁽³⁶⁾.

En resumen, las Ta ambientales elevadas afectan negativamente la fertilidad del carnero, esencialmente por disminuir la producción de espermatozoides, así como la cantidad y calidad del plasma seminal. Esto termina teniendo un impacto negativo en las características microscópicas del semen. Cabe mencionar que los carneros estresado por calor no recuperan inmediatamente su fertilidad óptima al cambiarlos a un ambiente termoneutral; de hecho, requieren permanecer entre 9 y 11 semanas en este ambiente para eyacular un semen de calidad normal⁽⁴⁷⁾.

Efectos en la conducta sexual

La conducta sexual de los carneros se ha evaluado poco bajo condiciones de EC, y los resultados hasta ahora son contradictorios. Considerando que el servicio de las hembras se da mayormente por monta natural en los diferentes sistemas de producción, resulta imperante elucidar en investigaciones futuras el impacto del EC en la capacidad de monta de los carneros.

En carneros de raza Malpura (adaptada a climas cálidos), el EC inducido en cámara termo-ambiental (42 °C) redujo el apetito sexual y la capacidad de monta, lo cual se dedujo porque los carneros estresados por calor presentaron mayor tiempo para hacer una monta con eyaculación, así como mayor número de intentos de monta tanto para el primer y segundo eyaculado⁽⁵³⁾. Igualmente, los carneros de raza Rembi presentaron menor libido durante la época de verano en una región árida⁽³⁸⁾. La reducción en la conducta sexual mostrada por los carneros expuestos a EC se asoció con una menor capacidad para secretar testosterona. Sin embargo, hay otros estudios realizados en carneros puros⁽²³⁾ o cruzados⁽⁷⁾ del genotipo Malpura, donde los efectos del EC en la conducta sexual fueron mínimos sin ninguna diferencia en las concentraciones séricas de testosterona. En carneros de raza de pelo usados en México, un estudio reportó solamente un aumento en el tiempo de reacción de monta por el efecto de la época seca y caliente comparado con la época fresca-húmeda de un clima tropical⁽³⁹⁾.

Las discrepancias entre resultados podrían deberse a que en esos estudios donde no hubo efectos^(7,23), las diferencias en Ta no eran tan marcadas. Otros factores importantes a considerar son la condición corporal (CC) y la estacionalidad reproductiva. Los carneros con CC óptima (3.0 en escala de 1 a 5 puntos) presentan mejor conducta sexual que los carnero con baja (≤ 2 puntos) o alta (≥ 4 puntos) CC bajo condiciones de EC⁽³⁷⁾. Por su parte, la época de verano representa un periodo de transición entre el final del periodo de anestro e inicio del periodo natural reproductivo⁽⁵⁸⁾. Por lo tanto, los carneros de las razas con mayor sensibilidad a la estacionalidad reproductiva podrían presentar una reducción en la conducta sexual durante el verano en regiones cálidas, no solo por las temperaturas altas, sino también por su ritmo circanual reproductivo natural. En el caso de las razas ovinas de pelo mexicanas, las cuales se caracterizan por presentar baja estacionalidad reproductiva pero alta adaptación a climas cálidos⁽⁵⁾, los efectos negativos esperados del EC en su conducta sexual podrían ser mínimos, tal como se demostró en condiciones tropicales⁽³⁹⁾. No obstante, poco se ha investigado este tema en carneros de razas de pelo y los estudios existentes aún son superficiales. Las razas de pelo en México tienen gran relevancia para la producción en carne en climas cálidos, por lo que resulta necesario investigar a profundidad el impacto que tiene el EC en la conducta de estos carneros.

Efectos en el daño espermático

El daño espermático por EC se comienza a generar desde las células espermáticas que están en diferenciación dentro de los túbulos seminíferos hasta los espermatozoides que están en tránsito en el epidídimo. Los espermatozoides en los carneros duran en maduración dentro del epidídimo entre 13 y 15 días, por lo cual son los primeros en evidenciar daños por hipertermia⁽⁵⁹⁾. Estudios previos reportan que la exposición de carneros a Ta mayores a 35 °C puede causar 17.5 % de cabezas piriformes⁽⁶⁰⁾, 18.5 % de anomalías en acrosoma⁽⁶¹⁾

y alrededor de 30 % de espermatozoides sin cola⁽³⁵⁾. En general, se estima que el EC crónico (> 60 días) causa en los espermatozoides un 43.4 % de anomalías menores (por ejemplo: presencia de gota citoplasmática distal, cola enrollada de la punta o completamente enrollada y cabezas normales libres) y 3.6 % de anomalías mayores (p.e. gota citoplasmática proximal y espermatozoides microcefálicos)⁽⁵⁷⁾. Otro estudio indicó que la elipticidad de la cabeza aparece en los eyaculados de los sementales ovinos a partir del día 42 posterior a la hipertermia testicular, lo cual se asocia a un daño directo del EC al espermatozoide en la fase de espermiogénesis, aunque no es claro el mecanismo que lleva a esta malformación de la cabeza⁽⁶²⁾. Cabe mencionar que el daño espermático generado por EC se vuelve constante mientras dichas condiciones ambientales permanecen, y generalmente se proyecta por varias semanas más después de que el desafío térmico termina^(1,50).

Los testículos deben permanecer entre 2 y 8 °C por debajo de la temperatura corporal para su correcto funcionamiento, de lo contrario, la hipertermia testicular provoca daños en las células somáticas y germinales del testículo⁽⁶³⁾. Los espermatoцитos y espermátidas se consideran más susceptibles a sufrir apoptosis por efecto del EC debido a su alta tasa meiótica^(1,47), aunque también puede ocurrir degeneración en espermatogonias, y células de Leydig y Sertoli^(23,64). Al parecer el EC crónico, pero no el agudo, afecta a los espermatozoides que ya han concluido su formación y se encuentran en el epidídimo^(63,64). Los espermatozoides localizados en el epidídimo aumentan su nivel de estrés oxidativo y disminuyen su capacidad antioxidante en respuesta a la exposición continua y prolongada al EC⁽⁶³⁾. Esto último se ha demostrado ampliamente en ratones, por lo que se requiere investigar al respecto en carneros.

Por otra parte, el flujo sanguíneo en los testículos de los carneros expuestos a EC es insuficiente, lo que causa hipoxia testicular y, junto con la hipertermia directa, promueve condiciones de estrés oxidativo por un aumento en las especies reactivas de oxígeno (ERO)⁽⁶³⁾. La excesiva producción testicular de ERO conduce a la peroxidación de los fosfolípidos de la membrana espermática, desencadenando un daño directo a nivel de integridad de membrana (20 % de degradación) y del ADN⁽²³⁾. Estos daños pueden disminuir la expresión de la proteína PH-20 en la membrana, la cual se encuentra asociada a la actividad de la unión del espermatozoide con la zona pelúcida⁽⁶⁵⁾. Además, hacen más susceptibles a los espermatozoides de los carneros a daños en la conformación de la cromatina⁽¹¹⁾, y a la presencia de fragmentación del ADN^(47,65). Este daño en el ADN espermático puede causar subfertilidad o infertilidad del carnero⁽¹¹⁾, así como una disminución en la resistencia de los espermatozoides cuando se utilizan en programas de inseminación artificial y fertilización *in vitro*⁽⁵¹⁾.

Mitigación del estrés por calor en carneros

El uso de estrategias de mitigación del EC es una necesidad para mejorar la capacidad reproductiva de los carneros en climas cálidos. Existe gran variedad de estrategias que pueden implementarse; sin embargo, no todas son igual de eficientes en todos los climas y sistemas de producción. Por ejemplo, en razas de lana, la esquila en los meses de verano es una estrategia ampliamente usada para mejorar la capacidad de termorregulación en carneros, sin embargo, en Argentina reportaron que la incidencia de cabezas espermáticas elípticas aumentó (76 %) en carneros Merino Australiano por esquilárselos completamente en un ambiente de EC⁽⁶²⁾. Similarmente, la esquila en carneros de raza de pelo Desert Hamari resultó efectiva para mejorar la termorregulación, pero contraproducente para la calidad seminal durante la época de verano⁽⁶⁰⁾. Por su parte, Rathore⁽⁶¹⁾ encontró 16 % menos cantidad de anomalías espermáticas por esquilar los testículos en carneros. Estos hallazgos sugieren la necesidad de realizar más estudios para determinar la efectividad de esta estrategia de mitigación del EC para mejorar la fertilidad del carnero.

En sementales Morada Nova y Santa Inés, la capacidad de termorregulación y la circunferencia escrotal y firmeza testicular mejoraron, además, las anomalías espermáticas disminuyeron por debajo del 4 % debido a la instalación de sombras⁽⁶⁶⁾. De forma similar, la implementación de sombras de asbesto mejoró el mantenimiento de normotermia en carneros de raza Barki⁽⁶⁷⁾. Por otro lado, un aumento en el flujo de aire en presencia de T_a altas aportó ventajas en las variables fisiológicas de los carneros⁽¹⁰⁾. Además, el uso de camas de paja en los corrales de alojamiento de los carneros mejoró la pérdida de calor corporal por conducción⁽¹⁾; sin embargo, no se tiene conocimiento del efecto de sistemas de enfriamiento o el uso de distintos materiales para cama sobre la actividad reproductiva del carnero.

Se ha observado en ovejas y corderos de engorda que la suplementación alimenticia con proteínas, lípidos, antioxidantes y minerales, mejora la manera en que enfrentan el EC^(1,68,69). Sin embargo, en carneros solamente hay información del uso de antioxidantes como estrategia de mitigación de los efectos del EC. La suplementación dietaria del antioxidante γ -oryzanol en carneros disminuyó en 26 % la producción de ERO e incrementó el porcentaje de espermatozoides con membrana intacta tras la hipertermia testicular; sin embargo, también hubo un aumento en las anomalías espermáticas⁽⁵⁹⁾. La administración parenteral de vitamina E o vitamina E más selenio, mejoró la calidad seminal y el apetito sexual de sementales Awassi sometidos a T_a de 43 a 54 °C⁽⁷⁰⁾. Cabe mencionar que se necesita desarrollar investigación sobre algunas estrategias nutricionales que puedan ayudar a minimizar los efectos negativos del EC en la reproducción de los carneros.

Por otra parte, con la intención de mejorar la capacidad de termorregulación en la descendencia, se ha optado por la selección de progenitores de razas autóctonas, que muestren capacidad de termorresistencia y adaptación al ambiente en que se han desarrollado⁽²⁷⁾. De éste modo, crece el interés por la identificación de marcadores genéticos como el gen de fecundidad Booroola (FecB), el cual aparte de incrementar la prolificidad de las ovejas, también influye positivamente en mejorar la capacidad de producir semen de calidad deseable bajo condiciones de clima cálido semi-árido en carneros de raza pura Garole o cruza con Malpura^(23,71).

Conclusiones

A pesar de las características de resistencia y rusticidad natural que poseen los ovinos, el EC provoca en el carnero una serie de cambios fisiológicos y metabólicos que modifican el balance energético y hormonal reproductivo, lo que finalmente repercute en forma negativa en las concentraciones sanguíneas de testosterona y, por ende, en la calidad seminal y conducta sexual. Aunado a esto, la hipertermia ocasiona daños directos a nivel de membrana y ADN del espermatozoide, disminuyendo su capacidad fecundante. Por lo tanto, el uso de estrategias de mitigación del EC en carneros es una necesidad para mantener la fertilidad en el rebaño, particularmente en la época caliente del año de climas cálidos. La estrategia de mitigación de EC a usar dependerá del tipo (agudo o crónico) e intensidad del EC (moderado o severo) al que se exponga el carnero, así como a su grado de adaptación al clima, por lo cual podría usarse desde una simple área sombreada con o sin ventiladores, hasta la suplementación de aditivos como antioxidantes.

Literatura citada:

1. Sejian V, Bhatta R, Gaughan J, Malik PK, Naqvi S, Lal R. Sheep production adapting to climate change. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd; 2017.
2. Bernabucci U, Lacetera N, Baumgard LH, Rhoads RP, Ronchi B, Nardone A. Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. *Animal* 2010;4(7):1167-1183.
3. Al-Dawood A. Towards heat stress management in small ruminants—a review. *Ann Anim Sci* 2017;17(1):59-88.
4. Marai IFM, El-Darawany AA, Fadiel A, Abdel-Hafez MAM. Physiological traits as affected by heat stress in sheep — A review. *Small Ruminant Res* 2007;71(1):1-12.
5. Vicente-Pérez R, Macías-Cruz U, Avendaño-Reyes L, Correa-Calderón A, López-Baca MA, Lara-Rivera AL. Impacto del estrés por calor en la producción de ovinos de pelo. *Rev Mex Cienc Pecu* 2020;11(1):205-222.

6. Bett B, Kiunga P, Gachohi J, Sindato C, Mbotha D, Robinson T, *et al.* Effects of climate change on the occurrence and distribution of livestock diseases. *Prev Vet Med* 2017;137:119-129.
7. Kumar D, Sejian V, Gaughan JB, Naqvi SMK. Biological functions as affected by summer season-related multiple environmental stressors (heat, nutritional and walking stress) in Malpura rams under semi-arid tropical environment. *Biol Rhythm Res* 2017;48(4):593-606.
8. Belhadj SI, Mohamed C, Najar T, Ghram A. Meta-analysis of some physiologic, metabolic and oxidative responses of sheep exposed to environmental heat stress. *Livest Sci* 2019;229:179–187.
9. Tort L, Teles M. The endocrine response to stress-a comparative view. In: Akin F editor. *Basic and clinical endocrinology up-to-date*. InTech; 2011:263-286.
10. Wojtas K, Cwynar P, Kołacz R. Effect of thermal stress on physiological and blood parameters in merino sheep. *Bull Vet Inst Pulawy* 2014;58(2):283-288.
11. Rahman MB, Schellander K, Luceno NL, Van Soom A. Heat stress responses in spermatozoa: Mechanisms and consequences for cattle fertility. *Theriogenology* 2018;113:102-112.
12. Damián JP, Bausero M, Bielli A. Acute stress, hypothalamic-hypophyseal-gonadal axis and testicular function—A review. *Ann Anim Sci* 2015;15(1):31-50.
13. Binsiya T, Sejian V, Bagath M, Krishnan G, Hyder I, Manimaran A, *et al.* Significance of hypothalamic-pituitary-adrenal axis to adapt to climate change in livestock. *Int Res J Agri Food Sci* 2017;2(1):1-20.
14. Aké-López J, Aké-Villanueva N, Segura-Correa J, Aké-Villanueva J, Montes-Pérez R. Effect of age and season on semen traits and serving capacity of Pelibuey rams under tropical conditions. *Livest Res Rural Dev* 2016;28(9):166. <http://www.lrrd.org/lrrd28/9/akel28166.htm>. Accessed Nov 25, 2019.
15. Kahwage PR, Esteves SN, Jacinto MAC, Junior WB, Machado R, Romanello N, *et al.* Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Ruminant Res* 2018;160:72-80.
16. Moura ABB, Brandao FZ, Esteves SN, de Souza GN, da Fonseca JF, Pantoja MHA, *et al.* Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology* 2019;123:123-131.
17. Inbaraj S, Sejian V, Bagath M, Bhatta R. Impact of heat stress on immune responses of livestock: a review. *Pertanika J Trop Agric Sci* 2016;39(4):459-482.

18. Li FK, Yang Y, Jemma K, Xia CH, Lv SJ, Wei WH. Effect of heat stress on the behavioral and physiological patterns of Small-tail Han sheep housed indoors. *Trop Anim Health Prod* 2018;50(8):1893-1901.
19. Leite PG, Marques JI, Furtado DA, Lopes Neto JP, de Souza BB, do Nascimento JWB. Ethology, physiological, and ingestive responses of sheep subjected to different temperatures and salinity levels of water. *Int J Biometeorol* 2019;63(8):1091-1098.
20. Collier RJ, Baumgard LH, Zimbelman RB, Xiao Y. Heat-stress: physiology of acclimation and adaptation. *Anim Frontier* 2019;9(1):12-19.
21. Macías-Cruz U, Correa-Calderón A, Mellado M, Meza-Herrera CA, Aréchiga CF, Avendaño-Reyes L. Thermoregulatory response to outdoor heat stress of hair sheep females at different physiological state. *Int J Biometeorol* 2018;62(12):2151-2160.
22. Macías-Cruz U, Álvarez-Valenzuela FD, Correa-Calderón A, Díaz-Molina R, Mellado M, Meza-Herrera CA, *et al.* Thermoregulation of nutrient-restricted hair ewes subjected to heat stress during late pregnancy. *J Therm Biol* 2013;38(1):1-9.
23. De K, Kumar D, Balaganur K, Kumar Saxena V, Thirumurugan P, Khursheed Naqvi SM. Effect of thermal exposure on physiological adaptability and seminal attributes of rams under semi-arid environment. *J Therm Biol* 2017;65:113-118.
24. Fonsêca VFC, Maia ASC, Saraiva EP, de Melo Costa CC, da Silva RG, Abdoun KA, *et al.* Bio-thermal responses and heat balance of a hair coat sheep breed raised under an equatorial semi-arid environment. *J Therm Biol* 2019;84:83-91.
25. Cain IJW, Krausman PR, Rosenstock S, Turner JC. Mechanisms of thermoregulation and water balance in desert ungulates. *Wildl Soc Bull* 2006;34(3):570-581.
26. NRC. National Research Council. Nutrient requirements of sheep. 6th ed. Washington, DC, USA: National Academy Press; 1985.
27. Berihulay H, Abied A, He X, Jiang L, Ma Y. Adaptation mechanisms of small ruminants to environmental heat stress. *Animals* 2019;9(3):75.
28. Baumgard LH, Rhoads RP, Jr. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu Rev Anim Biosci* 2013;1:311-337.
29. Mahjoubi E, Yazdi MH, Aghaziarati N, Noori GR, Afsarian O, Baumgard LH. The effect of cyclical and severe heat stress on growth performance and metabolism in Afshari lambs. *J Anim Sci* 2015;93(4):1632-1640.
30. Khalek TMMA. Thermoregulatory responses of sheep to starvation and heat stress conditions. *Egyptian J Anim Prod* 2007;44(2):137-150.

31. Al-Haidary A, Aljumaah R, Alshaikh M, Abdoun K, Samara E, Okab A, *et al.* Thermoregulatory and physiological responses of Najdi sheep exposed to environmental heat load prevailing in Saudi Arabia. *Pak Vet J* 2012;32(4):515-519.
32. Nazifi S, Saeb M, Rowghani E, Kaveh K. The influences of thermal stress on serum biochemical parameters of Iranian fat-tailed sheep and their correlation with triiodothyronine (T₃), thyroxine (T₄) and cortisol concentrations. *Comp Clin Path* 2003;12(3):135-139.
33. Macías-Cruz U, López-Baca MA, Vicente R, Mejía A, Álvarez FD, Correa-Calderón A, *et al.* Effects of seasonal ambient heat stress (spring *vs.* summer) on physiological and metabolic variables in hair sheep located in an arid region. *Int J Biometeorol* 2016;60(8):1279-1286.
34. Charmandari E, Tsigos C, Chrousos G. Endocrinology of the stress response. *Annu Rev Physiol* 2005;67:259-284.
35. Braden A, Mattner P. The effects of scrotal heating in the ram on semen characteristics, fecundity, and embryonic mortality. *Aust J Agric Res* 1970;21(3):509-518.
36. Chella L, Kunene N, Lehloenya K. A comparative study on the quality of semen from Zulu rams at various ages and during different seasons in KwaZulu-Natal, South Africa. *Small Ruminant Res* 2017;151:104-109.
37. Maurya VP, Sejian V, Kumar D, Naqvi SM. Effect of induced body condition score differences on sexual behavior, scrotal measurements, semen attributes and endocrine responses in Malpura rams under hot semi-arid environment. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2010;94(6):e308-e317.
38. Benia A, Taibi K, Ait-Amrane A, Belhamiti T, Hammoudi S, Kaidi R. Study of seasonal sexual activity variations in Algerian rams: Sexual behaviour, testosterone concentration control and environmental factors. *Afr J Biotechnol* 2013;12(41):6042-6048.
39. Cárdenas-Gallegos M, Aké-López J, Magaña-Monforte J, Centurión-Castro F. Libido and serving capacity of mature hair rams under tropical environmental conditions. *Arch Med Vet* 2015;47(1):39-44.
40. Senger PL. Pathways to pregnancy and parturition. 3rd ed. Pullman, Washington: Current conceptions, Inc; 2012.
41. Byers SW, Glover TD. Effect of scrotal insulation on the pituitary-testicular axis of the ram. *J Reprod Fertil* 1984;71(1):23-31.

42. Huanca W, Coronado L, Galloway DB. Efecto de la manipulación de la temperatura escrotal sobre las características clínicas, seminales y endocrinas en carneros. *Rev Inv Vet Perú* 2015;26(4):604-613.
43. Narayan E, Parisella S. Influences of the stress endocrine system on the reproductive endocrine axis in sheep (*Ovis aries*). *Ital J Anim Sci* 2017;16(4):640-651.
44. Tsigos C, Papanicolaou DA, Kyrou I, Raptis SA, Chrousos GP. Dose-dependent effects of recombinant human interleukin-6 on the pituitary-testicular axis. *J Interferon Cytokine Res* 1999;19(11):1271-1276.
45. Patel N, Kashanian JA. Thyroid dysfunction and male reproductive physiology. *Semin Reprod Med* 2016;34(6):356-360.
46. Hassanpour H, Kadivar A, Mirshokraei P, Nazari H, Afzali A, Badisanaye M. Connexin-43: A possible mediator of heat stress effects on ram Sertoli cells. *Vet Res Forum* 2015;6(2):125-130.
47. Alves MB, Andrade AF, Arruda RP, Batissaco L, Florez-Rodriguez SA, Oliveira BM, *et al*. Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology* 2016;86(3):795-805.e2.
48. Saab SA, Sleiman FT, Kallassy N, Darweesh WY, Aad PY. Effect of adaptation and heat stress on reproductive performances of fat-tail Awassi rams in eastern mediterranean. *Leban Sci J* 2011;12(1):31-44.
49. Karagiannidis A, Varsakeli S, Alexopoulos C, Amarantidis II. Seasonal variation in semen characteristics of Chios and Friesian rams in Greece. *Small Ruminant Res* 2000;37(1):125-130.
50. Panyaboriban S, Suwimonteerabutr J, Swangchan-Uthai T, Tharasanit T, Phutikanit N, Techakumphu M. Effect of heat stress on reproductive performance of an imported dorper ram: a case study in Thailand. *Thai J Vet Med* 2016;46(4):671-677.
51. Francis JR, Javvaji PK, Dhali A, Kolte AP, Roy SC, Giridhar K, *et al*. Seasonal variations in quality, preservability and fertilizing ability of ovine spermatozoa. *Biol Rhythm Res* 2019:1-12.
52. Marai IFM, El-Darawany AHA, Ismail ESAF, Abdel-Hafez MAM. Tunica dartos index as a parameter for measurement of adaptability of rams to subtropical conditions of Egypt. *Anim Sci J* 2006;77(5):487-494.

53. Maurya VP, Sejian V, Kumar D, Naqvi SMK. Impact of heat stress, nutritional restriction and combined stresses (heat and nutritional) on growth and reproductive performance of Malpura rams under semi-arid tropical environment. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2016;100(5):938-946.
54. Kafi M, Safdarian M, Hashemi M. Seasonal variation in semen characteristics, scrotal circumference and libido of Persian Karakul rams. *Small Ruminant Res* 2004;53(1):133-139.
55. Suhair SM, Abdalla MA. Effects of seasonal changes and shearing on thermoregulation, blood constituents and semen characteristics of desert rams (*Ovis aries*). *Pak J Biol Sci* 2013;16(24):1884-1893.
56. Belkadi S, Safsaf B, Heleili N, Tlidjane M, Belkacem L, Oucheriah Y. Seasonal influence on sperm parameters, scrotal measurements, and serum testosterone in Ouled Djellal breed rams in Algeria. *Vet World* 2017;10(12):1486-1492.
57. Moreira EP, Moura AdAA, Araújo AAd. Efeitos da insulação escrotal sobre a biometria testicular e parâmetros seminais em carneiros da raça Santa Inês criados no estado do Ceará. *R Bras Zootec* 2001;30(6):1704-1711.
58. Gastelum-Delgado MA, Avendaño-Reyes L, Álvarez-Valenzuela FD, Correa-Calderón A, Meza-Herrera CA, Mellado M, *et al.* Conducta estral circanual en ovejas Pelibuey bajo condiciones áridas del noroeste de México. *Rev Mex Cienc Pecu* 2015;6(1):109-118.
59. Escobar E, Lopes S, Malavolta C, Ramalho JB, Missio D, Pinto HF, *et al.* Effect of gamma-oryzanol on testicular degeneration induced by scrotal insulation in rams. *Theriogenology* 2019;128:167-175.
60. Rathore AK. A note on the effect of scrotal wool cover on morphological changes in ram spermatozoa due to heat stress. *Anim Prod* 1969;11(4):561-563.
61. Rathore AK. Acrosomal abnormality in ram spermatozoa due to heat stress. *Br Vet J* 1970;126(8):440-443.
62. Armengol MF, Sabino GA, Forquera JC, de la Casa A, Aisen EG. Sperm head ellipticity as a heat stress indicator in Australian Merino rams (*Ovis aries*) in Northern Patagonia, Argentina. *Theriogenology* 2015;83(4):553-559.e2.
63. Hamilton TR, Mendes CM, de Castro LS, de Assis PM, Siqueira AF, Delgado JdC, *et al.* Evaluation of lasting effects of heat stress on sperm profile and oxidative status of ram semen and epididymal sperm. *Oxid Med Cell Longev* 2016:12.

64. Silva LKX, Sousa JS, Silva AOA, Lourenco Junior JB, Faturi C, Martorano LG, *et al.* Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. *Andrologia* 2018;50(2):e12836.
65. Fleming JS, Yu F, McDonald RM, Meyers SA, Montgomery GW, Smith JF, *et al.* Effects of scrotal heating on sperm surface protein PH-20 expression in sheep. *Mol Reprod Dev* 2004;68(1):103-114.
66. Kahwage PR, Esteves SN, Jacinto MAC, Junior WB, Pezzopane JRM, de Andrade-Pantoja MH, *et al.* High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. *Int J Biometeorol* 2017;61(10):1819-1829.
67. Hassanin S, Abdalla E, Kotby E, Abd-Elaziz A, El-Fouly M. Efficiency of asbestos shading for growth of Barki rams during hot summer. *Small Ruminant Res* 1996;20(3):199-203.
68. Can A, Denek N, Yazgan K. Effect of replacing urea with fish meal in finishing diet on performance of Awassi lamb under heat stress. *Small Ruminant Res* 2005;59(1):1-5.
69. Sejian V, Singh AK, Sahoo A, Naqvi SM. Effect of mineral mixture and antioxidant supplementation on growth, reproductive performance and adaptive capability of Malpura ewes subjected to heat stress. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2014;98(1):72-83.
70. Talib AAB, Bomboi G, Floris B. Does vitamin E or vitamin E plus selenium improve reproductive performance of rams during hot weather? *Ital J Anim Sci* 2009;8(4):743-754.
71. Kumar D, Naqvi SMK, Kumar S. Sperm motion characteristics of FecBBB and FecBB+ Garole x Malpura rams during the non-breeding season under hot semi-arid environment. *Livest Sci* 2012;150(1):337-341.
72. De K, Kumar D, Saxena VK, Naqvi SM. Study of circadian rhythmicity of physiological response and skin temperature of sheep during summer and winter in semi-arid tropical environment. *Physiol Behav* 2017;169:16-21.
73. Pantoja MHA, Esteves SN, Jacinto MAC, Pezzopane JRM, Paz CCP, Silva J, *et al.* Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J Therm Biol* 2017;69:302-310.
74. Cwynar P, Kolacz R, Czerski A. Effect of heat stress on physiological parameters and blood composition in Polish Merino rams. *Berl Munch Tierarztl Wochenschr* 2014;127(5/6):177-182.



Seasonal heat stress compromises testicular thermoregulation and semen quality of Dorper rams raised in a desert climate

Alejandra L. Barragán ^a, Leonel Avendaño-Reyes ^a, Miguel Mellado-Bosque ^b, César A. Meza-Herrera ^c, Ricardo Vicente-Pérez ^d, Vielka J. Castañeda ^a, Raúl Díaz-Molina ^e, Ulises Macías-Cruz ^{a,*}

^a Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas, Mexicali, Baja California, 21705, Mexico

^b Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Nutrición Animal, Saltillo, Coahuila, 25315, Mexico

^c Universidad Autónoma Chapingo, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Bermejillo, Durango, 35230, Mexico

^d Universidad de Guadalajara-CUCSUR, Departamento de Producción Agrícola, Autlán de Navarro, Jalisco, 48900, Mexico

^e Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Medicina, Mexicali, Baja California, 21100, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:

Fertility
Hair sheep
Sperm abnormalities
Testicular heat stress
Spermatogenesis

ABSTRACT

Dorper rams are widely distributed throughout the world under different climatic conditions, however, little is known about their reproductive performance in desert regions. Ten Dorper rams were individually housed and exposed to thermoneutrality for 35 d in spring (23.6 ± 5.6 °C, mean \pm SD) and outdoor heat stress (HS) for 35 d in summer (33.6 ± 2.0 °C) to evaluate the effect of seasonal HS on physiological responses, testicular biometry, and seminal quality under desert climatic conditions. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures in different body regions were measured every 7 d (0600, 1200, and 1800 h); also, testicular biometry was registered at 0600 h. Semen was collected via an artificial vagina 3 d after physiological variables were measured and seminal traits were evaluated. Rectal temperature, respiration rate and coat surface temperatures were higher ($P < 0.01$) at each hour of measurement in summer compared to spring. Overall, scrotal length and circumference, as well as testicular volume were higher ($P < 0.01$) in summer than in spring. Compared to spring conditions, summer HS caused lower ($P \leq 0.05$) sperm concentration and viability combined with a higher percentage of sperm abnormalities without affecting ejaculate volume. Both mass and sperm motility were similar between seasons in the first two sampling weeks, and then decreased ($P \leq 0.03$) due to summer HS. In conclusion, Dorper rams developed testicle hyperthermia and, consequently, showed poor semen quality due to the high environmental temperatures prevailing in desert regions.

1. Introduction

The objective of global sheep production has been changing in recent decades from wool to meat production (Thorne et al., 2021). This has led to restructuring the strategies for genetic improvement, replacing or crossing wool-producing sheep with specialized meat breeds. This is also happening with autochthonous breeds of sheep from different regions of the world that present low growth potential (Zlobin et al., 2019). Remarkably, the Dorper sheep (*Ovis aries*) represents a meat breed with greater worldwide popularity due to its excellent growth rate and carcass muscularity, resulting in a good paternal line (terminal sire breed) in breeding programs developed for mutton production (Villatoro et al., 2021). So today, Dorper rams can be seen regularly in

sheep flocks in most countries of the world under different production systems and climates (Wanjala et al., 2023). This makes it necessary to know the reproductive capacity of these rams under different environmental conditions, particularly those that prevail in a desert climate, since global desertification continues to increase due climate change (Thomton et al., 2021; IPCC et al., 2023).

The extremely high temperatures occurring during the summer in desert regions represent the main challenge that Dorper rams face to conserve their fertility and productivity throughout the year (Barragán-Sierra et al., 2021). The spermatogenesis process demands a testicular temperature between 32 and 36 °C to maintain both sperm production and quality in sheep, while the summer ambient temperature exceeds 40 °C in some regions (McManus et al., 2020). Thus, in summer, these

* Corresponding author.

E-mail address: umacias@uabc.edu.mx (U. Macías-Cruz).

<https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2023.103737>

Received 9 June 2022; Received in revised form 16 October 2023; Accepted 20 October 2023

0306-4565/© 20XX

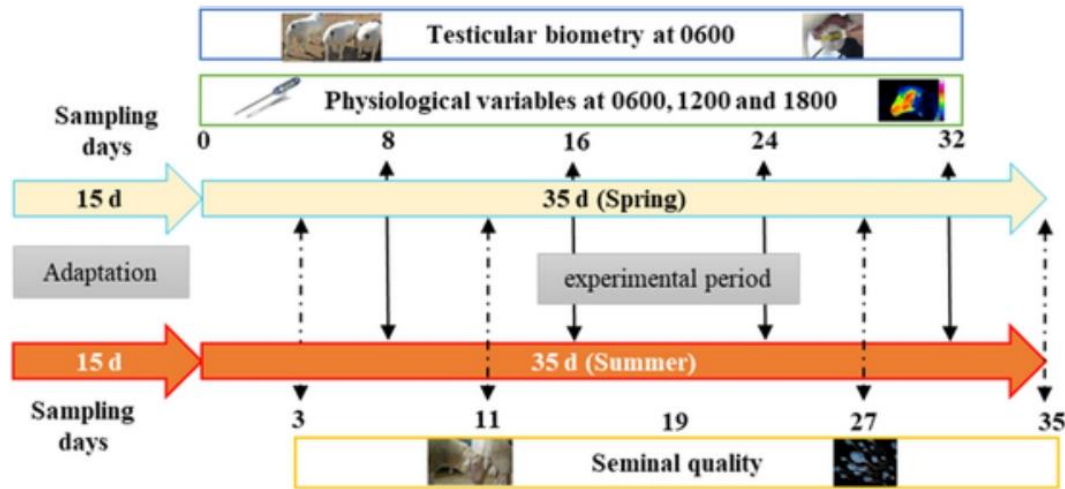


Fig. 1. Schematization of sampling and evaluation of study variables.

Table 1
Climatic (mean \pm SD) conditions during spring and summer in a desert zone.

	Maximum	Minimum	Mean
Spring			
Temperature ($^{\circ}$ C)	32.7 \pm 6.6	13.4 \pm 5.1	23.6 \pm 5.6
Relative humidity (%)	81.0 \pm 16.2	20.0 \pm 11.7	46.6 \pm 16.4
Temperature-humidity index (units)	76.0 \pm 5.5	55.8 \pm 8.7	67.7 \pm 6.5
Wind speed (m/s)	3.4 \pm 1.1	0.1 \pm 0.1	1.4 \pm 0.5
Solar radiation (W/m ²)	842.6 \pm 67.8	0.0 \pm 0.0	269.2 \pm 35.1
Summer			
Temperature ($^{\circ}$ C)	42.6 \pm 2.2	24.4 \pm 3.3	33.6 \pm 2.0
Relative humidity (%)	80.2 \pm 13.3	17.9 \pm 10.3	46.8 \pm 14.0
Temperature-humidity index (units)	86.4 \pm 2.3	73.5 \pm 5.4	81.1 \pm 3.3
Wind speed (m/s)	3.3 \pm 0.8	0.3 \pm 0.5	1.7 \pm 0.6
Solar radiation (W/m ²)	823.9 \pm 62.7	0.0 \pm 0.0	273.2 \pm 26.0

SD = Standard deviations.

rams continuously experience outdoor heat stress (HS), which could cause testicular hyperthermia and, consequently, reduced circulating testosterone concentration, testicular biometry and spermatogenesis, as well as sperm damage and low seminal quality, as already described using scrotal insulation (Alves et al., 2016; Júnior et al., 2015).

Dorper rams have shown to be thermotolerant to tropical HS conditions by maintaining normothermia (Pantoja et al., 2017) and continuing to reproduce (Cárdenas-Gallegos et al., 2012; Moura et al., 2019), however there is little information about their testicular thermoregulation capacity, seminal quality, and reproductive efficiency during the hot season in desert regions. Unlike the tropics and subtropics, sheep in desert areas are more directly exposed to high ambient temperatures and solar radiation due to low rainfall and minimal vegetation cover (De et al., 2017), so the reproductive function of Dorper rams could be further compromised in this environment. As a result, it was hypothesized that high summer environmental temperatures in desert regions compromise the physiological thermoregulatory capacity of Dorper rams, causing them testicular hyperthermia and poor seminal quality. The objective of the present study was therefore, to evaluate the effect of seasonal heat stress on thermoregulatory ability, testicular biometry, and seminal quality of Dorper rams under desert climatic conditions.

2. Materials and methods

The experiment was carried at the Local Livestock Association of Mexicali, Baja California, México (32°31' N and 115°12' W). This region presents a desert climate, characterized as dry and warm with extreme average temperatures of $\geq 44^{\circ}$ C between June and September, and low average rainfall per year (77.8 mm; INEGI, 2017). All management of rams was performed within approved Mexican Official Standards (NOM-051-ZOO-1995 and NOM-066-ZOO-1999).

2.1. Animals, treatments, and handling

Ten purebred Dorper rams with no visual signs of diseases, initial body weight of 52.3 \pm 4.5 kg, body condition score of 3.2 \pm 0.2 units (5-point scale; 1 = emaciated and 5 = obese; Russel et al., 1969) and 11 months old were selected. They were housed during the experimental period into 4.5 m² individual pens that had mesh shade (2.0 m²), feed trough and drinking trough. The experimental period lasted 100 d, 50 d in mid-spring (thermoneutral conditions) and 50 d in mid-summer (HS conditions), so each of these two seasons was considered a treatment. These study periods were established based on information from bioclimatic indices determined for sheep in the study area (Theusme et al., 2021). Note that the 50-d study period in each season was divided into 15 d of adaptation (pen and overall handling), and 35 d of sampling of study variables. Rams were housed in common corral after finishing the spring experimental period until the beginning of the next.

Rams were fed every day at 0700 and 1900 h with a mixed diet of chopped fodder (50 % oat straw and 50 % alfalfa hay), which met their nutritional requirements according to the NRC (2007). Clean water was available *ad libitum*, while the health of the animals was monitored visually every day and was recorded as good both before and throughout the experimental period.

2.2. Measurement of study variables

All study variables were measured only during the study period (35 d) of each season, at the same time intervals (Fig. 1). Air temperature (Ta, $^{\circ}$ C) and relative humidity (RH, %) were collected with a thermo-hygrograph (Thermotracker, Hígro, Culiacán, Sinaloa, Mexico) installed at the study area, which was programmed to measure every 15 min during the entire sampling period. The temperature-humidity index (THI) was calculated as: $THI = Ta^{\circ}F - [(0.55 - 0.55 RH) * (Ta^{\circ}F - 58)]$, where Ta was expressed in Fahrenheit degrees and RH divided

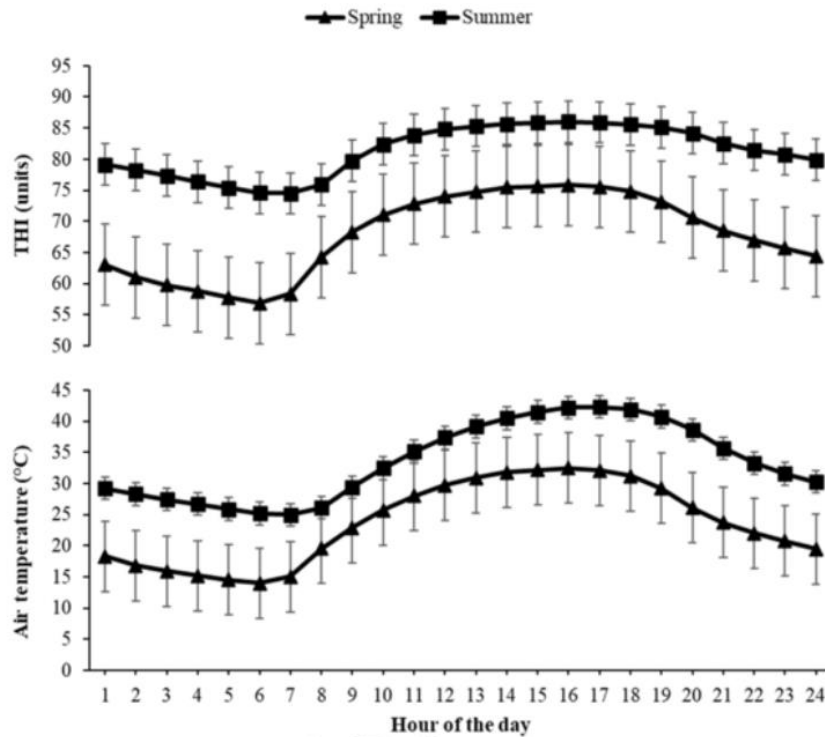


Fig. 2. Diurnal patterns of the temperature-humidity index (THI) and air temperature during spring and summer periods (means ± SD).

Table 2

Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on respiration rate (RR), rectal temperature (RT) and hair coat temperatures of yearling Dorper rams in desert conditions (mean ± SEM).

Hours	Spring			Summer			P-value		
	0600	1200	1800	0600	1200	1800	Season	Hour	Interaction
RT (°C)	38.24 ± 0.07**	39.01 ± 0.07**	39.18 ± 0.07**	38.88 ± 0.07	39.67 ± 0.07	39.91 ± 0.07	< 0.01	< 0.01	0.64
RR (rpm)	31.40 ± 2.19**	93.80 ± 2.19**	96.88 ± 2.19**	44.12 ± 2.19	130.96 ± 2.19	149.24 ± 2.19	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Hair coat temperature (°C)									
Eye	30.85 ± 0.26**	37.37 ± 0.26**	36.13 ± 0.26**	31.97 ± 0.26	42.99 ± 0.26	40.05 ± 0.26	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Nose	22.99 ± 0.44**	36.13 ± 0.44**	34.48 ± 0.44**	30.98 ± 0.44	42.65 ± 0.44	40.00 ± 0.44	< 0.01	< 0.01	0.01
Ear	18.93 ± 0.39**	36.28 ± 0.39**	34.17 ± 0.39**	31.00 ± 0.39	42.16 ± 0.39	39.46 ± 0.39	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Head	24.88 ± 0.31**	37.00 ± 0.31**	33.84 ± 0.31**	29.47 ± 0.31	45.53 ± 0.31	41.03 ± 0.31	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Neck	23.27 ± 0.33**	33.61 ± 0.33**	33.03 ± 0.33**	29.60 ± 0.33	44.60 ± 0.33	41.55 ± 0.33	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Loin	17.65 ± 0.53**	36.38 ± 0.53**	30.21 ± 0.53**	28.69 ± 0.53	45.20 ± 0.53	40.71 ± 0.53	< 0.01	< 0.01	0.05
Rump	17.04 ± 0.52**	37.20 ± 0.52**	30.53 ± 0.52**	28.24 ± 0.52	46.71 ± 0.52	41.89 ± 0.52	< 0.01	< 0.01	0.27
Leg	19.79 ± 0.44**	35.59 ± 0.44**	31.59 ± 0.44**	29.75 ± 0.44	43.87 ± 0.44	40.88 ± 0.44	< 0.01	< 0.01	0.23
Right flank	20.24 ± 0.48**	36.79 ± 0.48**	31.54 ± 0.48**	30.84 ± 0.48	45.03 ± 0.48	40.78 ± 0.48	< 0.01	< 0.01	0.11
Ribs	21.76 ± 0.37**	35.68 ± 0.37**	31.87 ± 0.37**	31.38 ± 0.37	43.37 ± 0.37	39.98 ± 0.37	< 0.01	< 0.01	0.03
Belly	26.04 ± 0.35**	35.68 ± 0.35**	34.27 ± 0.35**	30.26 ± 0.35	42.62 ± 0.35	40.42 ± 0.35	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Shoulder	22.40 ± 0.36**	35.83 ± 0.36**	32.42 ± 0.36**	31.01 ± 0.36	42.64 ± 0.36	40.33 ± 0.36	< 0.01	< 0.01	0.03
Scrotum	26.56 ± 0.32**	33.50 ± 0.32**	33.20 ± 0.32**	29.63 ± 0.32	40.83 ± 0.32	38.20 ± 0.32	< 0.01	< 0.01	< 0.01

** Differences between spring and summer conditions within the same hour (P < 0.01).

between 100 (LPHSI, 1990). Maximum and minimum average daily values were calculated, as well as the overall average daily value, with their respective standard deviations for all climatic variables.

Respiration rate (RR), rectal temperature (RT) and surface thermography on different body regions (i.e., eye, nostril, ear, head, loin, rump, leg, right flank, ribs, belly, shoulder and scrotum) were the physiological variables measured, which were recorded each 7 days at 0600, 1200 and 1800 h. Firstly, RR was recorded by counting the number of intercostal movements per minute, then rams were immobilized to measure RT by rectal insertion of a digital thermometer (Delta Track, Pleasanton, CA, USA) for 1 min, as well as to take two thermal images per ani-

mal (face and lateral full body) at a 2.5 m distance with an infrared thermographic camera (Fluke Ti10, Everett, WA, USA). All images were analyzed in a computer using the SmartView® software (version 3.6, Fluke, WA, USA) to determine the average temperature of each evaluated body region.

Testicular biometry was also evaluated by measuring spermatic cord perimeter, and scrotal circumference and length, as well as testicle width, length, and volume, just after physiological variables in the morning. The scrotal circumference was measured at the height of the largest testicular diameter and the spermatic cord perimeter was assessed in the middle part of it, while the scrotal length represented the

Table 3
Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on the testicular biometry (mean \pm SEM) of yearling Dorper rams in desert conditions.

	Season		P-value		
	Spring	Summer	Season	Week	Interaction
Scrotal length (cm)	12.62 \pm 0.51	17.34 \pm 0.51	<0.01	<0.01	<0.01
Spermatic cord perimeter (cm)	23.89 \pm 0.60	18.69 \pm 0.60	<0.01	0.02	<0.01
Scrotal circumference (cm)	30.19 \pm 0.56	33.10 \pm 0.56	<0.01	0.03	<0.01
Testicle width (cm)	6.30 \pm 0.11	6.98 \pm 0.11	<0.01	0.85	0.11
Testicle length (cm)	9.21 \pm 0.12	9.90 \pm 0.12	<0.01	0.04	0.76
Testicular volume (cm ³)	192.51 \pm 9.23	255.55 \pm 9.23	<0.01	0.30	0.18

distance from belly to the bottom of testis; these variables were measured with a flexometer. For its part, dimensions of the right and left testis were measured separately with a caliper, and then averaged to record testicular width (W) and length (L); both measurements were used to calculate testicular volume with the following formula: $V = 4/3 (\pi) (L/2) (W/2)^2$ (Bailey et al., 1998).

Semen collection was performed weekly using the artificial vagina technique, just three days after measuring physiological variables, to evaluate ejaculate volume and semen quality. For this, rams were previously trained to ejaculate into the artificial vagina by attempting to mount an estrogenized ewe (2 mg of estradiol cypionate i.m., Zoetis, NY, USA) that was restrained by a neck clamp. Thus, on the day of semen extraction, rams were individually led to the collection pen (4 \times 4 m) and their collected semen was immediately evaluated for ejaculate volume and microscopy characteristics using standard methods (Hafez and Hafez, 2013). Briefly, the ejaculate volume was measured directly in the graduated conical tube, and microscopy characteristics were assessed with an optical microscope (Model 29AX-E2050223, Motic, Hong Kong, China). While sperm concentration was determined in diluted semen (1:400) using a Neubauer chamber, the mass motility was evaluated at 100 \times magnification on a drop of undiluted semen applying a 0–5 scale (0 = immotile and 5 = vigorous waves with eddies). Progressive sperm motility was determined at 400 \times magnification in semen diluted with 0.9% saline solution, subjectively assigning a value between 0 and 100% according to the vigor and progressive movement observed in the spermatozoa. Sperm viability was assessed on 200 sperm cells stained with the eosin-nigrosin technique and observed at 400 \times magnification; same methodology was used to evaluate sperm abnormalities (primary and secondary) but using the Esperma-Form staining kit (FertiMéxico Laboratory, D.F., México). Both the number of live sperm and the number of sperm with abnormalities were expressed as a percentage of the number of sperm evaluated to calculate the percentage of viability and abnormalities.

2.3. Statistical analysis

Data were analyzed with the SAS program (version 9.4; SAS Inst. Inc., Cary NC). Descriptive statistics were used to summarize climatic variables. The Shapiro-Wilk test was applied to determine normality in all data, and they were transformed until reaching normality when necessary. So, physiological variables, testicular biometry and semen traits were analyzed under a completely randomized design with repeated measures over time using PROC MIXED. All models included fixed effects of season of the year, time (hour or week) and the interaction between them. Animal was nested within treatments as a random effect. Several variance-covariance structures were verified to fit the model, and the compound symmetry showed the best fit according to BIC and AIC criteria. Means were separated using the LSMEANS/PDIFF option, and significant differences were declared at $P \leq 0.05$.

3. Results

Mean \pm SD values of Ta, RH, THI, wind speed and solar radiation during the spring season were 23.6 \pm 5.6 $^{\circ}$ C, 46.6 \pm 16.4 %, 67.7 \pm 6.5 units, 1.4 \pm 0.5 m/s and 269.2 \pm 35.1 W/m², respectively, while in summer were 33.6 \pm 2.0 $^{\circ}$ C, 46.8 \pm 14.0 %, 81.1 \pm 3.3 units, 1.7 \pm 0.6 m/s and 273.2 \pm 26.0 W/m², respectively (Table 1 and Fig. 2). Overall, the summer study period was \sim 10 $^{\circ}$ C hotter than the spring period.

Table 2 shows results of physiological thermoregulation. Most of the physiological variables evaluated were affected ($P \leq 0.05$) by the season \times hour interaction, the exception being RT ($P = 0.64$) and body surface temperatures of anatomical regions: rump ($P = 0.27$), leg ($P = 0.23$), and right flank ($P = 0.11$). So, across daytime (i.e., 0600, 1200 and 1800 h), Dorper rams in summer exhibited higher ($P < 0.01$) RR and surface temperatures of eye, nose, ear, head, neck, loin, ribs, belly, shoulder and scrotum than in spring. In addition, they showed higher ($P < 0.01$) RT and temperatures of rump, leg and right flank in summer than in spring, independently of the hour of the day.

Table 3 and Fig. 3 show testicular biometry results. Only scrotal length, spermatic cord perimeter, and scrotal circumference were affected ($P < 0.01$) by the season \times week interaction, while the rest of the testicular measures had effects ($P < 0.01$) of season and week as main factors. Compared with spring, rams in summer exhibited higher ($P \leq 0.05$) scrotal circumference and length but lower ($P \leq 0.05$) spermatic cord perimeter across the five weeks. In addition, the testicles of the rams had higher ($P < 0.01$) length, width and volume in summer versus spring season.

Table 4 and Fig. 4 show semen characteristic results. There was a season \times week interaction effect ($P \leq 0.03$) only for mass and sperm motility, and abnormal sperm percentage, while season as main fact affected ($P = 0.05$) sperm concentration and viability, but not ejaculate volume ($P = 0.53$). Mass and sperm motility were similar ($P < 0.05$) in summer and spring ejaculates during the first two sampling weeks, but then both seminal parameters were lower ($P < 0.05$) in summer ejaculates compared to spring ejaculates (week 3–5). Sperm abnormalities were consistently higher ($P < 0.05$) across the five sampling weeks in summer ejaculates respect to spring ejaculates. Overall, there was lower ($P \leq 0.05$) sperm concentration and viability in summer ejaculated than in those of spring. Finally, the sperm viability showed changes ($P < 0.01$) among sampling weeks, but not ($P \geq 0.21$) sperm concentration and ejaculate volume.

4. Discussion

The upper limit of the thermoneutral zone for hair sheep is defined at 30 $^{\circ}$ C (Vicente-Pérez et al., 2020), and HS conditions from a THI = 72 units, which is classified as moderate (≥ 72 to < 74 units), severe (≥ 74 to < 78 units), and extremely severe (≥ 78 units; LPHSI, 1990). Based on the above, Dorper rams in this study were exposed to extremely severe HS during summer (Ta = \sim 36 $^{\circ}$ C and THI = 81 units), and thermoneutrality in spring (Ta = \sim 24 $^{\circ}$ C and THI = 68 units). Note that air movement in the warm season is an important factor increasing body heat loss in animals, particularly by non-evaporative means in absence of solar radiation; so, an average wind velocity of at least 2.4 m/s is desirable (Mader et al., 1999). Here, the summer wind speed averaged 1.7 m/s, much lower than expected, being a factor that could have compromised the efficiency of the physiological mechanisms to dissipate body heat load in rams. Despite this, RT results show that rams did not experience hyperthermia in summer or spring.

Unsurprisingly, given some previously published findings in hair breed rams (Kahwage et al., 2018; Pantoja et al., 2017; Moura et al., 2019), high summer Ta caused a significant increase in the core temperature of rams during daylight hours compared to spring, however, the

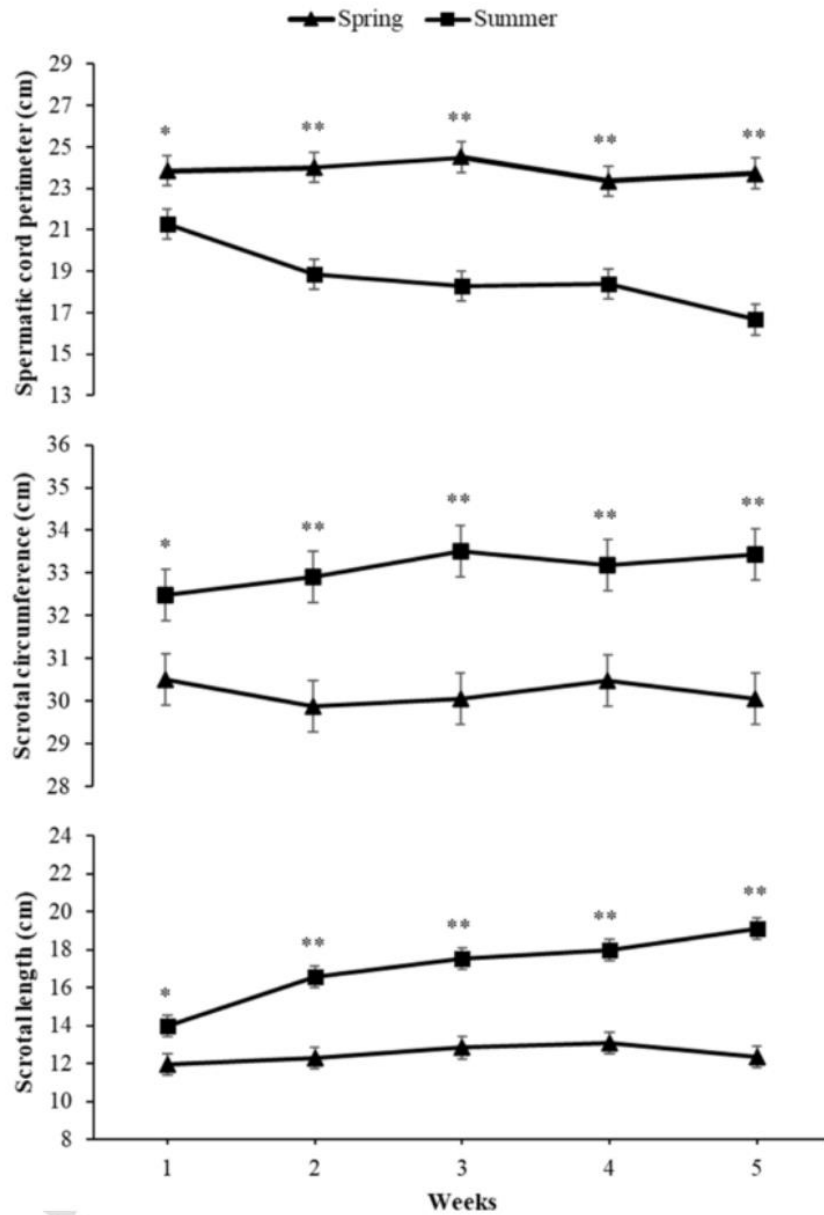


Fig. 3. Effects of the season \times week interaction on spermatic cord perimeter, scrotal length and scrotal circumference of yearling Dorper rams in desert conditions (** $P < 0.01$ and * $P \leq 0.05$, differences between seasons at each week; n.s. $P > 0.05$, no difference). Data are represented as mean \pm SEM.

physiological mechanisms of thermoregulation in these sheep acted efficiently to maintain them in normothermia. Thus, Dorper rams had a RT diurnal variation in spring and summer within the reference range (38.3–39.9 °C; Al-Dawood et al., 2017). Note that results of T_a circadian rhythm combined with diurnal variations in RR and body surface temperature suggest that Dorper rams avoided hyperthermia in summer due to the joint action of three sequentially activated mechanisms as described for Dorper \times Katahdin ram lambs experiencing HS in a desert region (Macías-Cruz et al., 2016; Vicente-Pérez et al., 2020). First, rams took advantage of the nighttime environmental conditions (i.e., absence of solar radiation and decreased T_a) to maximize the loss of body heat gained during the daytime, mainly by non-evaporative means. This is evidenced based on results of physiological variables measured at 06:00 h in summer season, where there was a reduction in RR while

the thermal gradient was widened in favor of body surface temperatures (~ 5 °C) with respect to the ambient. Second, rams in sunlight hours continued to lose their body heat load through cutaneous radiation, but also gradually increased their heat losses by evaporative means. Thus, in summer, rams at 12:00 h showed similar thermal gradient (+5.5 °C in surface temperatures) but almost three times more RR than in early morning (06:00 h). Finally, the third mechanism was detected when T_a exceeded 40 °C in sunlight hours (18:00 h), given that rams were losing their excessive body heat load essentially by evaporative means (i.e., higher RR and sweating rate) as mean T_a was above surface temperatures in all body region.

Like other body regions, the scrotum of Dorper rams seems to contribute to the dissipation of body heat load to maintain them in normothermia during the summer, making the testicular reproductive

Table 4
Effects of seasonal heat stress (summer vs. spring) on seminal characteristics of yearling Dorper rams in desert conditions (mean \pm SEM).

	Seasons		P-value		
	Spring	Summer	Season	Week	Interaction
Ejaculate volume (mL)	1.00 \pm 0.06	0.96 \pm 0.05	0.53	0.19	0.60
Sperm concentration (x10 ⁹ /mL)	5.08 \pm 0.34	4.20 \pm 0.31	0.05	0.21	0.11
Mass motility (0–5)	4.77 \pm 0.49	3.76 \pm 0.41	0.13	0.13	<0.01
Sperm motility (%)	58.16 \pm 6.90	50.77 \pm 6.07	0.45	0.16	0.03
Viability (%)	64.78 \pm 5.91	46.27 \pm 5.19	0.05	<0.01	0.12
Sperm abnormalities (%)	7.84 \pm 5.25	28.24 \pm 4.48	<0.01	<0.01	<0.01

function a secondary event. The increase in testicular size combined with decreased thermal gradient between RT and scrotal temperature in sunny summer hours compared to spring, suggests that these rams under outdoor HS of a desert climate increase testicular blood volume to take advantage of the high scrotal thermoregulatory capacity. The gradual and constant increase in blood flow is positively associated with scrotal circumference and testicle volume (Hedia et al., 2019). A study of yesteryear reported an increase in blood flux from the testicular artery when testis temperature was similar or exceeded body temperature in rams (Setchell, 1998), and more current research conducted in rams (Rizzoto et al., 2019) and bulls (Barros Adwell et al., 2018) has confirmed that testicular hyperthermia leads to increased gonadal blood availability. In fact, arterial blood is considered the main source of testicular heat as Ta increases (Barros Adwell et al., 2018). So, this finding is opposed to that reported commonly for induced hyperthermia effects on testicular size and the paradigm of “blood flow failure” in rams (Marai et al., 2006; van Wettere et al., 2021), meanwhile other studies conducted in outdoor environmental conditions found that summer HS in tropical climate does not alter testicular dimensions in hair breed rams such as Dorper, Santa Ines and Morada Nova (Cárdenas-Gallegos et al., 2012; Kahwage et al., 2017; Moura et al., 2019). The latter, together with our results, show that Dorper rams are more sensitive to summer stress in desert regions than in tropical regions.

Notably, heat-stressed Dorper rams had increased scrotal length and thinned spermatic cord during the summer experimental period, indicating testicular descent in response to high temperatures, as previously reported in other studies (Júnior et al., 2015; Marai et al., 2006). This is a well-known mechanism of testicular thermoregulation in heat-stressed male ruminants, and is possible through relaxation of the cremaster muscle (Barragán Sierra et al., 2021). Despite this effort to maintain temperature of testes below (4–6 °C) the core temperature during summer, rams experienced daily testicular hyperthermia throughout the afternoon (scrotal temperature = 38–41 °C vs. RT = 39.7–39.9 °C), and consequently a decline in seminal quality in this hot season. Overall, there was a reduction for sperm concentration and viability combined with an increase in the percentage of abnormalities due to HS. Mass and sperm motility also decreased on the last weeks of sampling in summer. Similar deleterious effects have been noted in the semen quality of Dorper rams when their scrotum is insulated with testicle heating bag (Alves et al., 2016; Júnior et al., 2015). But there are also reports indicating no change or minimal effects on semen characteristics due to summer HS in tropical climates, both in Dorper (Cárdenas-Gallegos et al., 2012; Moura et al., 2019) and in other hair breed rams (Kahwage et al., 2018). Remarkably, overall mean values of the evaluated seminal parameters are within the expected reference range in both seasons (Hafez and Hafez, 2013), so the drop in semen quality due to summer HS is not a factor limiting the fertility of Dorper ram in desert or arid climates.

It is worth noting that the negative effects of HS on production, morphology and functioning of sperm are not reflected immediately in semen quality but are gradual, since the process of spermatogenesis is

cyclical and each cycle takes about of 49 days (Barragán Sierra et al., 2021). It is well documented that HS alters spermatogenesis at different points in this biological process and can cause temporary infertility in rams in the medium or long term (Alves et al., 2016), depending on degree of adaptation of the breed and severity of testicular HS (van Wettere et al., 2021). Chronologically, the semen from heat-stressed rams shows an increase in sperm abnormalities to short term due to structural damage to epididymal spermatozoa; then in the medium term, sperm motility decreases, a slight decrease in the number of sperm begins, and sperm morphological abnormalities continue to increase as a result of alterations in spermatocytes and spermatids (higher DNA damage and lipid peroxidation, lower mitochondrial membrane potential and apoptosis); meanwhile in the long term, the negative effects on seminal parameters seminal quality parameters continue to grow, being able to reach a semen with azoospermia under extreme chronic HS (Alves et al., 2016; Júnior et al., 2015; García-Oliveros et al., 2020). Although in our study semen quality was not evaluated at least one complete spermatogenesis cycle, the aforementioned explains the decrease in overall sperm concentration and its motility across the last weeks of the study, as well as the gradual increase in sperm abnormalities due to summer HS.

5. Conclusions

Desert heat stress conditions moderately reduced the semen quality of Dorper rams by compromising testicular normothermia. Despite this, they were thermotolerant to these environmental conditions by activating physiological thermoregulation mechanisms according to the intensity of thermal stress to maintain homeothermy.

Funding source

This research is part of the project entitled “Variations in physiological and metabolic responses of rams by effect of the summer heat stress”, which was approved by the Autonomous University of Baja California, Mexico (Register key: 200/2460).

CRedit authorship contribution statement

Alejandra L. Barragán : Investigation, Formal analysis, Writing – original draft. Leonel Avendaño-Reyes : Conceptualization, Methodology, Writing – review & editing. Miguel Mellado-Bosque : Writing – review & editing. César A. Meza-Herrera : Writing – review & editing. Ricardo Vicente-Pérez : Resources, Writing – review & editing. Vielka J. Castañeda : Data curation, Formal analysis. Raúl Díaz-Molina : Validation, Writing – review & editing. Ulises Macías-Cruz : Methodology, Funding acquisition, Conceptualization, Visualization, Supervision, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Art_SeminalTrait_DorperSheep (Original data) (Mendeley Data).

Acknowledgments

This article is part of the research project of the first author, who thanks CONACYT-México for the scholarship that she received to carry out her doctoral studies. This gratitude is extensive to the MSc. Marco A. Contrera for lending his rams and facilities, as well as to the MScs.

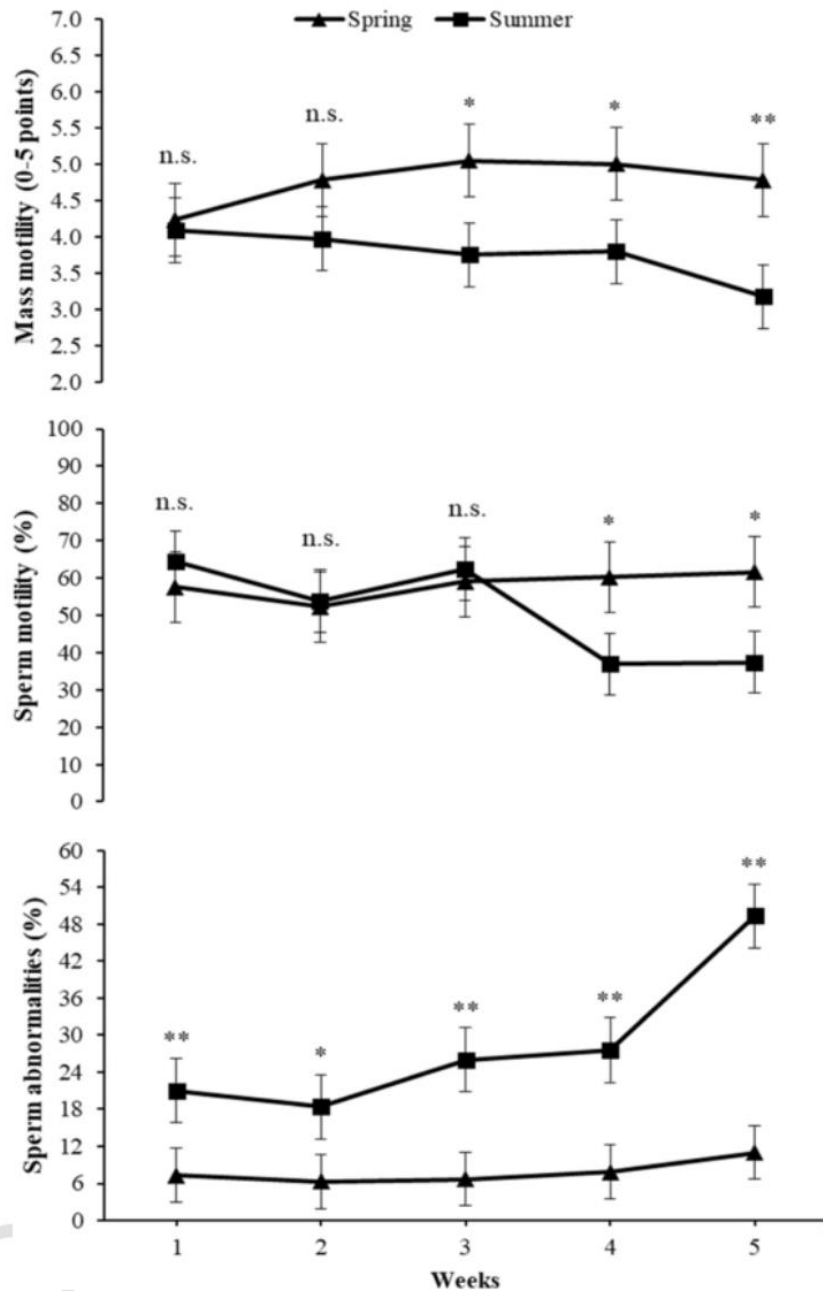


Fig. 4. Effects of the season \times week interaction on sperm mass motility, and percentage sperm motility and abnormalities of yearling Dorper rams in desert conditions (** $P < 0.01$ and * $P \leq 0.05$, differences between seasons at each week; n.s. $P > 0.05$, no difference). Data are represented as mean \pm SEM.

Jennifer Montiel González, Karen Valadéz García and Porfirio Nicolas López who helped in the field phase.

References

- Al-Dawood, A., 2017. Towards heat stress management in small ruminants—a review. *Ann. Anim. Sci.* 17, 59–88.
- Alves, M.B., Andrade, A.F., Arruda, R.P., Batissaco, L., Florez-Rodriguez, S.A., Oliveira, B.M., Torres, M.A., Lanconi, R., Ravagnani, G.M., Prado Filho, R.R., Vellone, V.S., Losano, J.D., Franci, C.R., Nichi, M., Celeghini, E.C., 2016. Recovery of normal testicular temperature after scrotal heat stress in rams assessed by infrared thermography and its effects on seminal characteristics and testosterone blood serum concentration. *Theriogenology* 86, 795–805.
- Bailey, T.L., Hudson, R.S., Powe, T.A., Riddell, M.G., Wolfe, D.F., Carson, R.L., 1998. Caliper and ultrasonographic measurements of bovine testicles and a mathematical formula for determining testicular volume and weight in vivo. *Theriogenology* 49, 581–594.
- Barragán Sierra, A., Avendaño-Reyes, L., Hernández, R.J.A., Vicente-Pérez, R., Correa-Calderón, A., Mellado, M., Meza-Herrera, C.A., Macías-Cruz, U., 2021. Thermoregulation and reproductive responses of rams under heat stress. *Rev. Mex. Cienc. Pecu.* 12, 910–931.
- Barros Adwell, C.M.Q., Brito, L.F.C., Oba, E., Wilde, R.E., Rizzoto, G., Thundathil, J.C., Kastelic, J.P., 2018. Arterial blood flow is the main source of testicular heat in bulls and higher ambient temperatures significantly increase testicular blood flow. *Theriogenology* 116, 12–16.
- Cárdenas-Gallegos, M.A., Aké-López, J.R., Centurión-Castro, F., Magaña-Monforte, J.G.,

2012. The breed and season effects on scrotal circumference and semen characteristics of hair sheep rams under tropical conditions. *Reprod. Domest. Anim.* 47, e92–e94.
- De, K., Kumar, D., Balaganur, K., Kumar Saxena, V., Thirumurugan, P., Khurshed Naqvi, S.M., 2017. Effect of thermal exposure on physiological adaptability and seminal attributes of rams under semi-arid environment. *J. Therm. Biol.* 65, 113–118.
- García-Oliveros, L.N., de Arruda, R.P., Batissaco, L., Gonzaga, V.H.G., Nogueira, V.J.M., Florez-Rodriguez, S.A., Almeida, F.d.S., Alves, M.B.R., Pinto, S.C.C., Nichi, M., Losano, J.D.d.A., Kawai, G.K.V., Celeghini, E.C.C., 2020. Heat stress effects on bovine sperm cells: a chronological approach to early findings. *Int. J. Biometeorol.* 64, 1367–1378.
- Hafez, E.S.E., Hafez, B., 2013. *Reproduction in Farm Animals*, seventh ed. John Wiley & Sons, p. 509.
- Hedia, M.G., El-Belely, M.S., Ismail, S.T., Abo El-Maaty, A.M., 2019. Monthly changes in testicular blood flow dynamics and their association with testicular volume, plasma steroid hormones profile and semen characteristics in rams. *Theriogenology* 123, 68–73.
- INEGI, 2017. *Anuario estadístico y geográfico de Baja California*. From: https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITXEF_Docs/BCN_ANUARIO_PDF.pdf.
- IPCC, 2023. In: Lee, H., Romero, J. (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35–115. From: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- Júnior, C.A.C., Lucci, C., Peripolli, V., Tanure, C., Ribeiro, L., Barbosa, T., Ramos, A., Louvandini, H., McManus, C., 2015. Laser and thermographic infrared temperatures associated with heat tolerance in adult rams. *Small Rumin. Res.* 132, 86–91.
- Kahwage, P.R., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Junior, W.B., Machado, R., Romanello, N., Passeri, L.F., de Mendonça, K.L., Garcia, A.R., 2018. Assessment of body and scrotal thermoregulation and semen quality of hair sheep rams throughout the year in a tropical environment. *Small Rumin. Res.* 160, 72–80.
- Kahwage, P.R., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Junior, W.B., Pezzopane, J.R.M., de Andrade Pantoja, M.H., Bosi, C., Miguel, M.C.V., Mahlmeister, K., Garcia, A.R., 2017. High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. *Int. J. Biometeorol.* 61, 1819–1829.
- LPHSI, 1990. *Livestock and Poultry Heat Stress Indices*. Agriculture Engineering Technology Guide. Clemson University, Clemson, SC, USA.
- Macías-Cruz, U., López-Baca, M.A., Vicente, R., Mejía, A., Álvarez, F.D., Correa-Calderón, A., Meza-Herrera, C.A., Mellado, M., Guerra-Liera, J.E., Avendaño-Reyes, L., 2016. Effects of seasonal ambient heat stress (spring vs. summer) on physiological and metabolic variables in hair sheep located in an arid region. *Int. J. Biometeorol.* 60 (8), 1279–1286.
- Mader, T.L., Dahlquist, J.M., Hahn, G.L., Gaughan, J.B., 1999. Shade and wind barrier effects on summertime feedlot cattle performance. *J. Anim. Sci.* 77, 2065–2072.
- Marai, I.F.M., El-Darawany, A.H.A., Ismail, E.S.A.F., Abdel-Hafez, M.A.M., 2006. Tunica dartos index as a parameter for measurement of adaptability of rams to subtropical conditions of Egypt. *Anim. Sci. J.* 77, 487–494.
- McManus, C.M., Faria, D.A., Lucci, C.M., Louvandini, H., Pereira, S.A., Paiva, S.R., 2020. Heat stress effects on sheep: are hair sheep more heat resistant? *Theriogenology* 155, 157–167.
- Moura, A.B.B., Brandao, F.Z., Esteves, S.N., de Souza, G.N., da Fonseca, J.F., Pantoja, M.H.A., Romanello, N., Botta, D., Giro, A., Garcia, A.R., 2019. Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. *Theriogenology* 123, 123–131.
- NRC, 2007. *Nutrient Requirements of Small Ruminants: Sheep, Goats, Cervids, and New World Camelids*. Natl. Acad. Press. Washington, DC.
- Pantoja, M.H.A., Esteves, S.N., Jacinto, M.A.C., Pezzopane, J.R.M., Paz, C.C.P., Silva, J., Lourenco Junior, J.B., Brandao, F.Z., Moura, A.B.B., Romanello, N., Botta, D., Garcia, A.R., 2017. Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. *J. Therm. Biol.* 69, 302–310.
- Rizzoto, G., Hall, C., Tyberg, J.V., Thundathil, J.C., Caulkett, N.A., Kastelic, J.P., 2019. Testicular hyperthermia increases blood flow that maintains aerobic metabolism in rams. *Reprod. Fertil. Dev.* 31, 683–688.
- Russel, A.J.F., Doney, J.M., Gunn, R.G., 1969. Subjective assessment of body fat in live sheep. *J. Agric. Sci.* 72, 451–454.
- Setchell, B.P., 1998. The parkes lecture. Heat and the testis. *J. Reprod. Fertil.* 114, 179–194.
- Theusme, C., Avendaño-Reyes, L., Macías-Cruz, U., Correa-Calderón, A., García-Cueto, R.O., Mellado, M., Vargas-Villamil, L., Vicente-Pérez, A., 2021. Climate change vulnerability of confined livestock systems predicted using bioclimatic indexes in an arid region of México. *Sci. Total Environ.* 751, 141779.
- Thorne, J.W., Murdoch, B.M., Freking, B.A., Redden, R.R., Murphy, T.W., Taylor, J.B., Blackburn, H.D., 2021. Evolution of the sheep industry and genetic research in the United States: opportunities for convergence in the twenty-first century. *Anim. Genet.* 52 (4), 395–408.
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., Herrero, M., 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biol.* 27, 5762–5772.
- van Wettere, W.H.E.J., Kind, K.L., Garford, K.L., Swinbourne, A.M., Leu, S.T., Hayman, P.T., Kelly, J.M., Weaver, A.C., Kleemann, D.O., Walker, S.K., 2021. Review of the impact of heat stress on reproductive performance of sheep. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 12 (1), 26.
- Vicente-Pérez, R., Macías-Cruz, U., Avendaño-Reyes, L., Correa-Calderón, A., López-Baca, M.A., Lara-Rivera, A.L., 2020. Heat stress impacts in hair sheep production. *Rev. Mex. Cienc. Pec. 11*, 205–222.
- Villatoro, K.M., Yang, F., Duarte, T., Phillips, C.R., Woerner, D.R., Chao, M.D., Yang, X., 2021. Quality, proximate composition, and sensory characteristics of Dorper, domestic commercial crossbred, and Australian sheep meat: a comparative study. *Transl. Anim. Sci.* 5, txab024.
- Wanjala, G., Astuti, P.K., Bagi, Z., Kichamu, N., Strausz, P., Kusza, S., 2023. Assessing the genomics structure of dorper and white dorper variants, and dorper populations in South Africa and Hungary. *Biology* 12 (3), 386.
- Zlobin, A.S., Volkova, N.A., Borodin, P.M., Aksenovich, T.I., Tsepilov, Y.A., 2019. Recent advances in understanding genetic variants associated with growth, carcass, and meat productivity traits in sheep (*Ovis aries*): an update. *Arch. Anim. Breed.* 62, 579–583.