



UNIVERSIDAD DE MURCIA

FACULTAD DE MEDICINA

Estudio sobre Diferentes Aspectos de la Visión y la
Anatomía Ocular del Toro de Lidia

D. Matteo Lo Sapia
2015

UNIVERSIDAD DE
MURCIA



Departamento de Física

Laboratorio de Óptica

**ESTUDIO SOBRE DIFERENTES ASPECTOS
DE LA VISIÓN Y LA ANATOMÍA OCULAR
DEL TORO DE LIDIA**

Trabajo presentado en la Facultad de Medicina

de la Universidad de Murcia por:

Matteo Lo Sapio

para aspirar al Grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

Doctorado en Ciencias de la Visión. Facultad de Medicina.

Laboratorio de Óptica. Departamento de Física.

Universidad de Murcia.

Octubre 2015

Dr. D. Juan Manuel Bueno García, Profesor Titular de Universidad del Área de Óptica en el Departamento de Física de la Universidad de Murcia,

Dr. D. Juan Seva Alcaraz, Profesor Titular de Universidad del Área de Anatomía Patológica Veterinaria en el Departamento Anatomía y Anatomía Patológica Comparadas de la Universidad de Murcia,

AUTORIZAN:

La presentación de la tesis doctoral titulada, "**ESTUDIO SOBRE DIFERENTES ASPECTOS DE LA VISIÓN Y LA ANATOMÍA OCULAR DEL TORO DE LIDIA**", realizada por D. Matteo Lo Sapio bajo su inmediata dirección y supervisión, y que presenta para la obtención del Grado de Doctor por la Universidad de Murcia.

Murcia, 16 de Octubre de 2015.

- No lo he olvidado -dijo hoscamente. Y luego, con mayor resentimiento aún-: Creí que me ayudarías.
- Pienso intentarlo. Ahora mismo quiero que te esfumes. Estar aquí cuando aparezca el padre de Shannon sería como agitar un trapo rojo delante de un toro. Deja que vea en qué posición estamos, y cómo está él, y a lo mejor te llamo para que salgas al porche.

"1922", en Todo Oscuro, Sin Estrellas (Stephen King, 2011)

“La fiesta de los toros es la más culta que hay hoy en el mundo.”

Federico García Lorca (1898-1936)

A mis hijos.

*A los taurinos,
y también a los “anti”,
pobres ignorantes que creen que los toros
no van más allá de la mera Fiesta Nacional.*

Resumen

El sentido de la vista es uno de los elementos más importantes en la calidad de vida de los seres humanos en particular, y de los animales en general. En el caso de estos últimos, la visión influye tanto en la actividad diaria, como en su relación con el entorno. Un análisis detallado de las características ópticas y morfológicas del globo ocular es importante no sólo desde el punto de vista científico básico, sino porque permite comprender (o predecir) mejor el comportamiento de determinados animales y entender sus actitudes frente a ciertos estímulos externos.

Puesto que el toro de lidia es un animal criado exclusivamente para un “comportamiento optimizado” durante la lidia, es de especial importancia un conocimiento en profundidad de los diferentes aspectos de su sistema visual, ya que cualquier anomalía en la visión puede mermar o inutilizar al animal para dicho cometido, y por tanto comprometer la actividad del torero durante el desarrollo de la misma. Es por ello que en esta Tesis Doctoral se ha desarrollado un estudio sobre diferentes aspectos de la visión, así como sobre la anatomía ocular del toro de lidia.

En primer lugar se ha medido el campo visual en el plano horizontal. Los resultados muestran que la divergencia de los ejes visuales y el campo binocular se mantienen estables con la edad, pero por el contrario, la distancia interpupilar y la zona de exclusión visual frontal aumentan.

En segundo lugar se ha estudiado el estado refractivo ocular. Se ha encontrado que el toro de lidia es, en media, hipermetrope en el meridiano horizontal. Dicho valor es mayor en animales adultos que en jóvenes. Además, presenta también astigmatismo, puesto que el meridiano vertical es “más miope” que el horizontal.

En tercer lugar se han analizado algunas características anatómicas del globo ocular con instrumentación de última generación. Se ha observado que la longitud axial aumenta significativamente con la edad y que la densidad de células fotorreceptoras retinianas es mayor en la parte superior que en la inferior. Finalmente se ha estudiado la resolución visual anatómica a partir de la distribución de células fotorreceptoras retinianas.

Abstract

The sense of sight is one of the key elements determining the quality of life of human beings and animals. In animals, vision is important for both daily activity and their interaction with the environment. A detailed analysis of optical properties and morphology of the ocular globe is of interest not only from a scientific point of view, but also because their behavior can be better understood and sometimes predicted.

The fighting bull (“toro bravo” in Spanish) is genetically selected for an optimized performance during the fight (“lidia”) at the arena. Since some visual anomalies might put the bullfighter (“torero” or “matador”) under an excessive risk, or invalidate the animal for this purpose, a detailed knowledge of its visual system would be of special importance. In this sense, this PhD Thesis is centered on the study of different aspects of the visual system of the fighting bull and the analysis of its ocular anatomy.

The first part of this work deals with the measurements of the dimensions of the horizontal visual field. Whereas the divergence of the visual axes and the binocular visual field keep fairly constant with age, both the inter-pupillary distance and the frontal blind area show a noticeable increase.

The second set of results consisted on the study of the ocular refractive state. The horizontal meridian was found to be, on average, hyperopic. Moreover, adult animals presented higher hyperopia values than young ones. The vertical meridian was more “myopic”, what means that the eye of the fighting bull presents astigmatism.

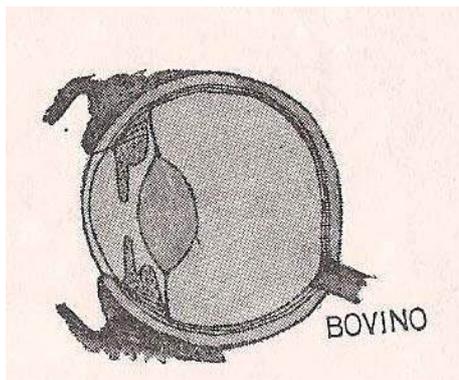
Some particular characteristics of the ocular anatomy were explored with novel techniques in the last chapter of results. Among them, the axial length was shown to increase with age and the density of photoreceptor cells decreased from the upper to the lower part of the retina. Finally, the anatomical visual resolution has been computed from the distribution of ganglion cells.

Índice

1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Anatomía del ojo del bovino	3
1.1.1 Córnea	6
1.1.2 Cámara anterior e iris	8
1.1.3 Cristalino	9
1.1.4 Cuerpo vítreo	13
1.1.5 Retina y coroides	13
1.1.6 Esclera	17
1.2. Campo visual y divergencia de ejes visuales	18
1.2.1. Campo visual monocular y binocular	18
1.2.2. Campo visual en el bovino	21
1.3. Agudeza visual en bovinos	24
1.4. Refracción ocular	26
1.4.1. Tipos de ametropía ocular	27
1.4.2. Medida de la refracción: Concepto de retinoscopía	29
1.4.3. Medida de la refracción en modelos animales	31
1.5. El toro de lidia y la problemática visual	33
1.6. Objetivos y estructura del trabajo	35
2. Campo Visual en el Toro de Lidia	37
2.1. Introducción	39
2.2. Métodos	42
2.2.1. Muestras	42
2.2.2. Cálculo del campo visual horizontal	44
2.3. Resultados	47
2.3.1. Campo visual en ganado de lidia en vivo	47
2.3.2. Campo visual en ganado de lidia <i>post-mortem</i>	48
2.3.3. Campo visual en ganado de lidia y edad: un resumen	51
2.4. Discusión	52
3. Estado Refractivo Ocular del Toro de Lidia	57
3.1. Introducción	59
3.2. Métodos	62
3.2.1. Medida de la refracción ocular en bovinos	62
3.2.2. Muestras	62
3.3. Resultados	65
3.3.1. Refracción ocular en ganado de lidia <i>post-mortem</i>	65
3.3.2. Refracción ocular en ganado de lidia en vivo	67
3.3.3. Refracción ocular en ganado manso <i>post-mortem</i>	70
3.3.4. Refracción ocular a lo largo de dos meridianos perpendiculares en ganado de lidia <i>post-mortem</i>	72

3.4. Discusión	74
3.4.1. Refracción ocular en el meridiano horizontal	74
3.4.2. Astigmatismo	76
3.4.3. Refracción ocular y tauromaquia: el toro burriciego	78
4. Aspectos Novedosos sobre la Anatomía Ocular del Toro de Lidia	81
4.1. Introducción	83
4.1.1. Longitud axial del ojo	83
4.1.2. Estructura retiniana y células fotorreceptoras	84
4.2. Métodos	85
4.2.1. Sistemas experimentales	85
4.2.2. Muestras	92
4.3. Resultados	94
4.3.1. Longitud axial ocular del toro de lidia	94
4.3.2. Imágenes OCT de la retina del toro de lidia	96
4.3.3. Imágenes multifotónicas de células retinianas en el toro de lidia	99
4.4. Discusión	101
4.4.1. Longitud axial ocular del toro de lidia	101
4.4.2. Estructura retiniana y células fotorreceptoras	103
5. Conclusiones	107
6. Bibliografía	111
Agradecimientos	125

Introducción



CAPÍTULO 1

Introducción y Objetivos

1.1. Anatomía del ojo del bovino

La posición de los ojos en la cabeza de un animal está ligado tanto al entorno o hábitat en el que vive, como a la forma de alimentarse. Los depredadores suelen presentar una disposición frontal (perro, gato, león, humano,...), mientras que los no depredadores (fundamentalmente herbívoros) los tienen en una disposición lateral. Las cavidades orbitales que contienen los ojos del bovino están colocadas en los laterales del cráneo (Figura 1.1) y separadas unos 150 mm [Gelatt et al., 2013]. Cada órbita contiene tanto el órgano fundamental (globo ocular) como los anexos (músculos extraoculares, párpado, conjuntiva y aparato lacrimal). Su tamaño es notablemente mayor (65x64x120 mm [Gelatt et al., 2013]) que el volumen del globo ocular, que está rodeado por gran cantidad de masa muscular y tejido graso [Prince et al., 1960]. Este hecho facilita, si fuera el caso, posibles intervenciones quirúrgicas.

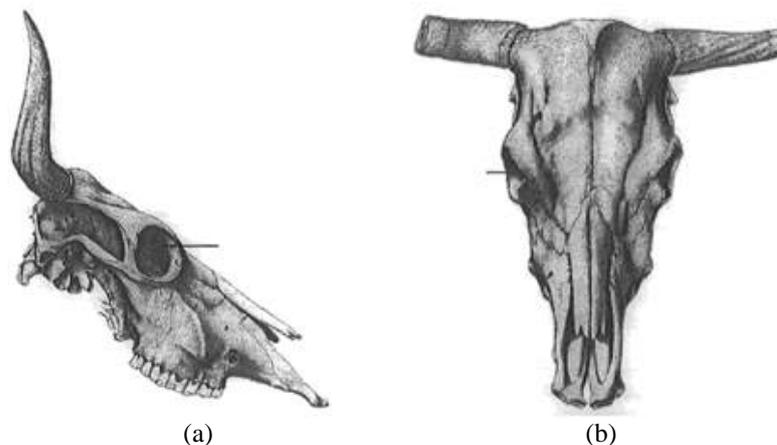


Figura 1.1. Vistas lateral (a) y frontal (b) del cráneo de un bovino donde se indica la posición lateral de las órbitas oculares [Valette, 2002].

El ojo de los mamíferos domésticos es “prácticamente” esférico aunque en el caso de bovinos y caballos es una esfera con cierta asimetría donde el eje antero-posterior es un poco más corto. Este eje (geométrico) se define como la línea geométrica que une el ápex corneal con el polo posterior del globo ocular. La distancia entre ambos puntos es la denominada longitud axial del ojo.

En el ojo realmente no existe un único eje óptico, sino varios ejes, cada uno asociado a distintos aspectos fisiológicos. El eje pupilar es la línea perpendicular a la córnea que pasa por el centro de la pupila. Por su parte la línea de mirada une el punto de fijación con el centro de la pupila y éste con la fovea, siendo ésta la zona de la retina que permite la máxima visión de detalles [Leeson et al., 1985]. Estos ejes se suelen aproximar por el eje óptico y el eje visual respectivamente [Atchison and Smith, 2000].

Las partes del ojo de un bovino son similares a las del resto de los mamíferos y en particular a las del humano (Figura 1.2). Las diferencias estriban no sólo en que su tamaño es de los más grandes que se encuentran en la naturaleza (Figura 1.3), sino que como veremos en las siguientes secciones, la agudeza visual difiere y además el bovino posee una superficie hiper-reflectiva en la retina (el denominado *tapetum lucidum*).

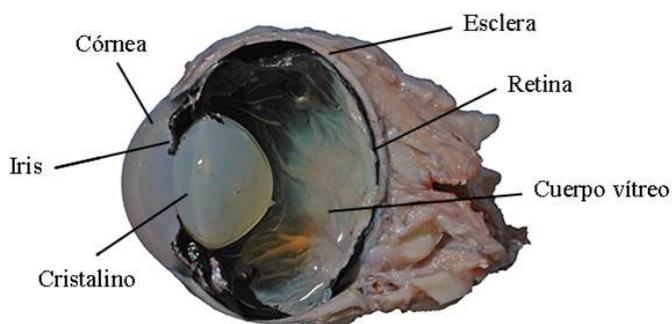


Figura 1.2. Componentes del ojo de un bovino.
(Figura adaptada de <http://district.bluegrass.kctcs.edu/>).

Las primeras medidas anatómicas encontradas en la literatura de la distancia antero-posterior del ojo mostraron valores medios entre 34 y 37 mm (bueyes adultos) [Prince et al., 1960]. En la dirección vertical las dimensiones fueron 37-42 mm y en la transversal oscilaron entre 38 y 43 mm. El uso de técnicas más refinadas como la biometría con ultrasonidos (Figura 1.4) mostraron valores de longitud axial de unos 38 mm [Freeman, 1963] en bovinos adultos.

Experimentos posteriores en vivo con la misma técnica han mostrado que este parámetro depende de la raza y lo sitúan entre 34.6 mm (Holstein o Frisona, 61 meses) y 32.7 mm (Jersey, 74 meses) [Potter et al., 2008]. Estos resultados no variaron cuando las medidas se

realizaron en los meridianos horizontal y vertical. En búfalos adultos (50 meses) el valor fue de 32.9 mm [Assadnassab and Fartashvand, 2013] similar a otro encontrado anteriormente [El-Maghraby et al., 1995]. Sin especificar la edad y usando cortes histológicos, se estableció un rango de longitudes axiales entre 28 y 37 mm para diferentes especies de bovino [Howland et al., 2004].

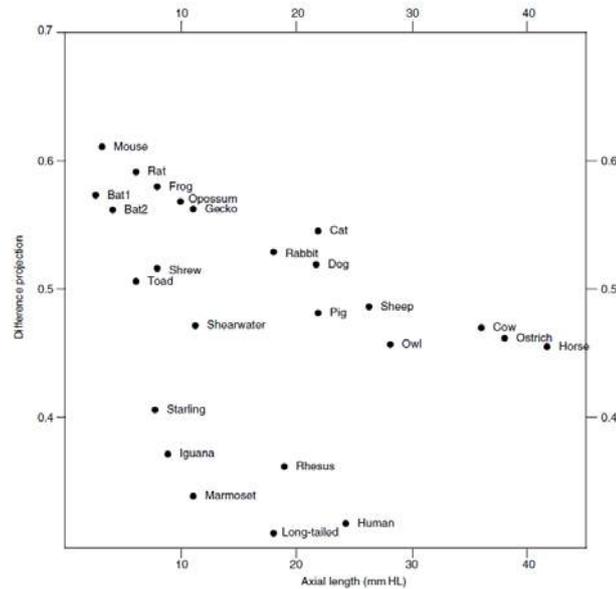


Figura 1.3. Longitudes axiales en diferentes animales [Clement, 2004].

Para hacerse la idea del tamaño del ojo de un bovino a grandes rasgos y teniendo en cuenta que el globo ocular en un ojo humano adulto es de unos 24 mm, sería como comparar una pelota de tenis con una de golf. En los humanos recién nacidos es de 16-17 mm y aumenta rápidamente de tamaño, alcanzando el tamaño adulto a los 13 años. En humanos adultos la longitud axial ocular es ligeramente mayor en el varón que en la mujer [Leeson et al., 1985].

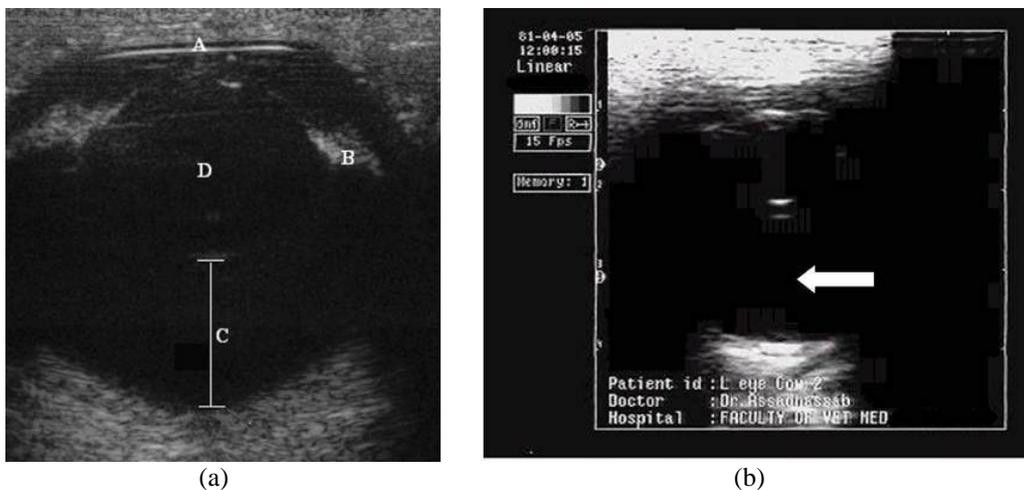


Figura 1.4. Imagen de ultrasonidos de ojos de bovino. (a) [Potter, 2008]: A, córnea; B, iris; C, cuerpo vítreo; D, cristalino. (b) La flecha indica el cuerpo vítreo [Assadnassab and Fartashvand, 2011].

1.1.1. Córnea

La córnea está situada en la parte delantera del globo ocular, es transparente y constituye 1/6 de la túnica fibrosa del ojo [Bloom and Fawcett, 1970]. Actúa como una lente convexo-cóncava con un espesor mayor en la periferia que en el centro y posee gran parte de la potencia óptica total del ojo. El radio de curvatura de la primera superficie es menor que el del globo ocular, de ahí su forma prominente al observar el ojo en su conjunto. La córnea es avascular pero está muy inervada. Entre las funciones puramente ópticas se incluyen su capacidad de refracción (debido tanto a su curvatura como a la diferencia entre los índices de refracción del aire y la propia córnea) y su transmisión (debido a su transparencia).

En el ganado bovino la córnea es más rígida y prominente que en ser humano (véase Figura 1.2). De fuera hacia dentro se distinguen varias capas: el epitelio, la membrana de Bowman, el estroma, la membrana de Descemet y el endotelio (Figura 1.5). Mientras que algunos autores apoyan la existencia de la membrana de Bowman entre el epitelio del estroma [Tseng et al., 1982], y que incluso es relativamente gruesa [Hayashi et al., 2002], con un espesor de $9\pm 1\ \mu\text{m}$ [Aly, 2003], otros afirman que no existe [Prince et al., 1960]. El epitelio tiene un espesor de $\sim 90\ \mu\text{m}$ y consta de 14-17 capas de células [Kim et al., 2004] que tienen la posibilidad de regenerarse. Sirve de barrera de protección para evitar lesiones e infecciones. El estroma ocupa $\sim 90\%$ del espesor corneal y está formado en su mayor parte por fibras de colágeno cuya disposición regular es la responsable de la transparencia.

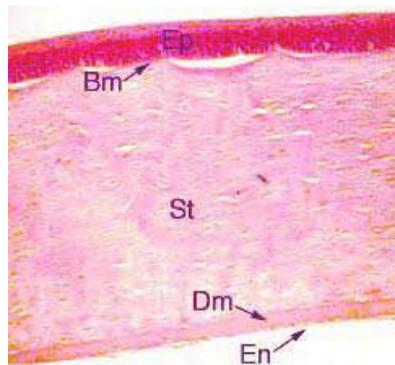


Figura 1.5. Corte histológico teñido de una córnea de bovino [Aly, 2003]. Ep, epitelio; Bm, membrana de Bowman; St, estroma; Dm, membrana de Descemet; En, endotelio.

En los bovinos la membrana de Descemet es una capa homogénea y elástica que sirve de transición entre el estroma y el endotelio con un espesor de $10\text{-}30\ \mu\text{m}$ [Aly, 2003]. El endotelio está formado por una única capa de células, mide unas $6\text{-}8\ \mu\text{m}$ y su parte más interna está en contacto directo con el humor acuoso de la cámara anterior [Prince et al., 1960];

Aly, 2003]. Medidas con microscopía electrónica han revelado que las células del endotelio forman un mosaico poligonal, de las cuales el 75% tiene forma hexagonal [Doughty et al., 1995]. La Figura 1.6 muestra una imagen de una córnea de bovino registrada con la técnica denominada tomografía de coherencia óptica (para más detalles sobre esta véase el Capítulo 4) y los espesores correspondientes.

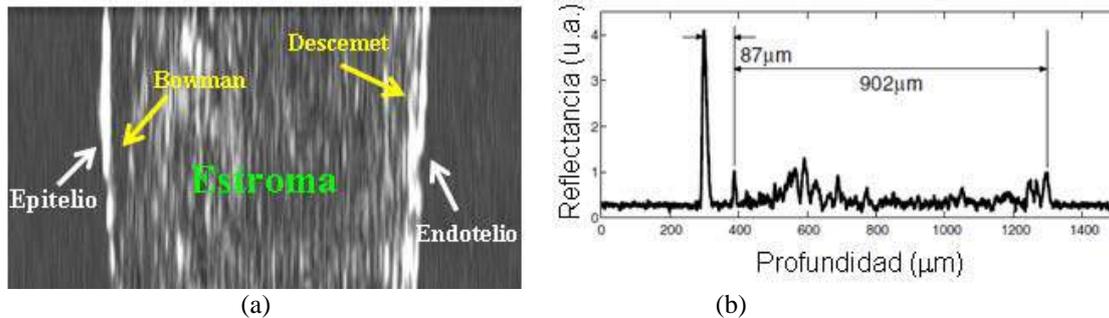


Figura 1.6. Imagen de una córnea de bovino registrada con tomografía de coherencia óptica (a). Perfil de intensidad a lo largo de una línea horizontal (b). Figura adaptada de [Kim et al., 2004].

La cornea suele tener en general una forma elíptica con el eje horizontal mayor que el vertical. En la mayoría de los ungulados estas diferencias son más pronunciadas para favorecer un mayor campo visual en la dirección horizontal, que está complementado con la disposición lateral de los ojos que se comentó anteriormente. La combinación del tamaño de la córnea y de la posición de los ojos parece ser resultado tanto de una adaptación a los hábitos de alimentación como de protección ante posibles depredadores [Samuelson, 1999].

En los bovinos la córnea tiene unas dimensiones de 27-32 y 22-24 mm en las direcciones horizontal y vertical respectivamente [Prince et al., 1960]. Medias posteriores en 100 ojos enucleados dieron resultados similares: diámetros horizontal y vertical de 29.8 ± 1.3 mm y 23.9 ± 1.9 mm respectivamente [Doughty et al., 1995]. Además se encontró que el diámetro horizontal era mayor en ojos con córneas más gruesas. Los radios de curvatura de la primera y segunda cara son respectivamente 15.8 y 15.0 mm [Coile and O'Keefe, 1988].

En animales domésticos el espesor corneal central se sitúa en el rango entre 0.56 y 1 mm. A diferencia de los caballos, en humanos, bovinos, perros, gatos y cerdos, entre otros, dicho espesor aumenta ligeramente hacia la periferia [Banks, 1993; Wilkie and Whittaker, 1997; Slatter, 2001; Gelatt et al., 2013;]. Aunque medidas fisiológicas fijaron en 0.75-0.85 mm el espesor corneal central del bovino [Prince et al., 1960; Taminura, 1977], los valores varían según los autores. Esto se debe a que este parámetro depende de factores tan variados como el nivel de hidratación, la presión intraocular, la edad, el sexo y el método de medida, entre otros. También depende de la especie de bovino analizada (2.0 ± 0.2 y 1.7 ± 0.2 mm

[Potter et al., 2008]), e incluso dentro de una misma especie, puede incluso variar entre individuos. Se ha reportado un valor de $1015 \pm 104 \mu\text{m}$ ($N=315$), que es uniforme en el 3% de la zona central del la córnea [Doughty et al., 1995]. También se han comparado medidas de ultrasonidos (1.4 mm) con las obtenidas de secciones histológicas (1.1 mm) [El-Maghraby et al., 1995]. En otros experimentos los valores variaron entre $1024 \pm 0.2 \mu\text{m}$ [Kim et al., 2004] y 1.5-2.0 mm [Sisson et al., 1975]. En la periferia, la córnea del bovino mide entre 1.5 y 1.8 mm [Sisson et al., 1975; Samuelson, 1999].

1.1.2. Cámara anterior e iris

Entre la córnea y el cristalino se encuentra la cámara anterior. Este espacio lo llena el humor acuoso, que circula libremente, está en constante renovación y aporta nutrientes a la córnea y al cristalino, por ser éstas avasculares (Figura 1.7). Ocupa un volumen de 1.7 ml [Gelatt et al., 2013] y tiene un índice de refracción de 1.339 [Mandleman and Sivak, 1983]. El espesor de la cámara anterior es de unos 6.0 mm [Freeman, 1963]. Este valor es similar a los 6.2 mm obtenidos por El-Maghraby et al. [1995], pero muy diferente de los 3.3-3.6 mm de Potter et al. [2008] y 2.9 mm de Assadnassab y Fartashvand [2013]. El equilibrio entre la producción de humor acuoso y su drenaje establece los valores de presión intraocular, que en bovino se estima que es de 20-30 mmHg [Gelatt et al., 2013].

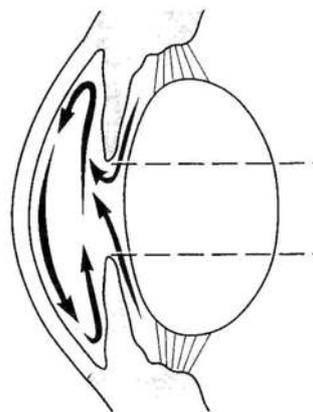


Figura 1.7. Esquema de la cámara anterior del ojo. Las flechas indican la circulación del humor acuoso y las líneas discontinuas marcan las dimensiones de la pupila [Schmit, 2008]

El iris está colocado detrás de la córnea, y es una continuación del cuerpo ciliar. [Tortora and Anagnostakos, 1981; Samuelson, 1999]. Separa la cámara anterior de la posterior y tiene un espesor de entre 20 y 80 μm [Prince et al., 1960]. Aunque en los humanos puede tener colores variados, en los bovinos está muy pigmentado y es normalmente de color marrón oscuro [Samuelson, 1999; Aly, 2003]. La apertura central se denomina pupila y

ópticamente funciona como diafragma de apertura, es decir, sirve para limitar la cantidad de luz que entra en el ojo, contrayéndose o dilatándose de forma involuntaria [Dyce et al., 1987; Samuelson, 1999].

En el ojo del bovino la pupila tiene forma ovalada con su eje mayor a lo largo de la dirección horizontal (Figura 1.8). Con la dilatación la forma tiende a ser circular. En condiciones de dilatación parcial tiene unas dimensiones de 13x15 mm [Prince et al., 1960]. En otros herbívoros como los equinos y ovinos también se puede encontrar de este tipo de pupilas [Walls, 1942; Samuelson, 1999]. La forma ovalada de la pupila unido a la morfología de la retina (véase apartado 1.1.5) induce a pensar que la percepción visual en los bovinos podría depender de si los objetos están en disposición horizontal o vertical.

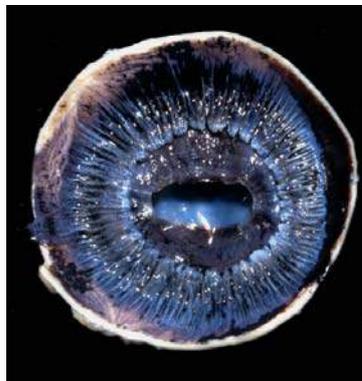


Figura 1.8. Iris de un ojo de bovino donde se puede apreciar su forma ovalada cuando está contraído. Foto cortesía del Prof. J. M. Vázquez-Autón.

1.1.3. Cristalino

El cristalino es la lente transparente biconvexa situada detrás del iris y delante del cuerpo vítreo (Figuras 1.2 y 1.9). En él se distinguen 3 partes: la cápsula, el epitelio y las fibras [Slatter, 2001]. El cristalino propiamente dicho está colocado dentro de la cápsula y sujeto al globo ocular por las fibras zonulares y el músculo ciliar. Es el responsable del mecanismo acomodativo por el cual cambia su forma (la curvatura de las caras y el espesor aumentan) y permite que objetos colocados a diferentes distancias puedan enfocarse sobre la retina y por lo tanto verse nítidos. La función óptica del cristalino es añadir potencia a la córnea para que las imágenes dadas por el ojo se sitúen sobre la retina, independientemente de la posición del objeto a observar.

En términos generales, si un ojo puede enfocar objetos desde el infinito (cristalino desacomodado) hasta unos 20 cm (cristalino totalmente acomodado) la acomodación sería de 5 dioptrías (D). En el ser humano se sabe que esta capacidad se va perdiendo con la edad y se denomina presbicia o coloquialmente “vista cansada” [Duane, 1912; Atchison, 1995]. Según

Helmholtz el músculo ciliar y la elasticidad de la cápsula permiten la acomodación (véase [Atchison and Smith, 2000] como referencia general). Sin embargo se ha mostrado que un desarrollo del músculo ciliar no siempre asegura la existencia de un mecanismo acomodativo [McBrien et al., 1993]. Otros experimentos achacan esta ausencia de capacidad acomodativa a la estructura interna de las propias fibras del cristalino [Kuszak et al., 2006].



Figura 1.9. Cristalinos de bovino. En la imagen de la derecha se puede apreciar el aumento por el hecho de funcionar como lente convergente [<http://www.exploratorium.edu/>].

De todos los componentes del ojo del bovino, el cristalino es el más denso, seguido por la esclera, la córnea, la retina, el humor acuoso y el vítreo [Su et al., 2009]. Las superficies del cristalino del bovino son “más curvadas” que las del ojo humano (Figura 1.2) y al igual que en éste, la superficie posterior tiene un radio de curvatura claramente menor que la primera (es decir, la cara posterior es más curvada que la anterior) [Slatter, 2001]. En el caso de cristalinos aislados de vaca, se establecieron radios de 12.98 y 9.22 mm para la 1ª y 2ª superficie respectivamente [Sivak y Kreuzer, 1983]. El cristalino tiene un diámetro de 19.5 mm, un volumen aproximado de 2.2 cm³ y un espesor de 13.3 mm [Prince et al., 1960; Gelatt et al., 2013]. Dicho espesor es similar al encontrado posteriormente con diferentes técnicas (entre 12 y 15 mm) [Fath El-Bab et al., 1982; Sivak y Kreuzer, 1983; Kreuzer and Sivak, 1985; Samuelson, 1999]. Otros autores lo sitúan en un rango más pequeño 8.2-9.4 mm [El-Maghraby et al., 1995]. Se ha mostrado también que para edades similares este espesor depende de la raza de bovino estudiada (17.8-19.2 mm) [Potter et al., 2008].

Los estudios sobre la amplitud de acomodación en bovinos son escasos. Se estima que la acomodación en el ojo bovino es mínima o no existe [Prince et al., 1960, Sivak, 1980; Baldwin, 1981; Bühren et al., 2009] debido posiblemente a un desarrollo no completo de los músculos ciliares [Glasser and Kaufman, 2003]. Se sabe que es menor que en humanos y mayor que en roedores, quizás no más de 2-3 D [Rafferty and Scholz, 1989; Bettelheim, 1999; Glasser and Kaufman, 2003]. Algo similar le ocurre a la oveja [Kendrick, 1990] y al

conejo [McBrien et al., 1993]. A efectos comparativos, una amplitud acomodativa de 2 D es la que tiene una persona de 50-55 años, considerada ya presbita [Duane, 1912].

A partir de fotografías laterales de cristalinios de bovino en vitro, se compararon el volumen, el diámetro ecuatorial y el espesor al pasar de un estado relajado, acomodado o sin tensión, a uno bajo tensión o no acomodado (Figura 1.10) [Gerometta et al., 2007]. El espesor del cristalino en condiciones naturales o acomodado es de 12.5 mm y se reduce en un 3.2% para un estado de no acomodación. Por su parte el diámetro pasa de 18.0 a 18.4 mm (aumento del 2.2%) y el volumen de 2.06 a 1.95 ml.

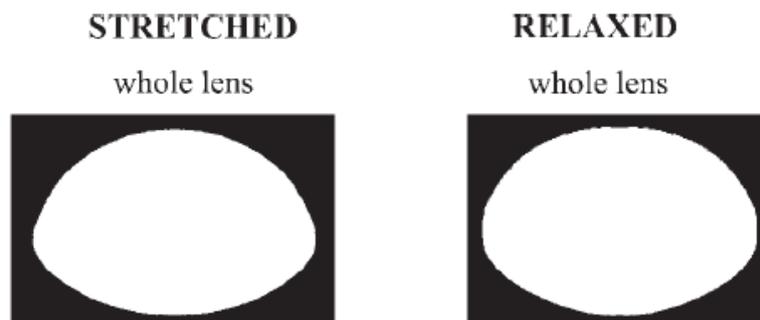


Figura 1.10. Perfil del cristalino de un bovino en estado desacomodado (stretched, izquierda) y acomodado (relaxed, derecha) [Gerometta et al., 2007].

El cristalino de bovino ha sido también objeto de estudio en aspectos relacionados con aberraciones ópticas, tales como la aberración esférica y la aberración cromática. La primera de ellas está asociada al cambio de potencia cuando los rayos de luz pasan por zonas fuera del eje óptico (véase Figura 1.11) y por tanto iría asociada al tamaño de la pupila del ojo.

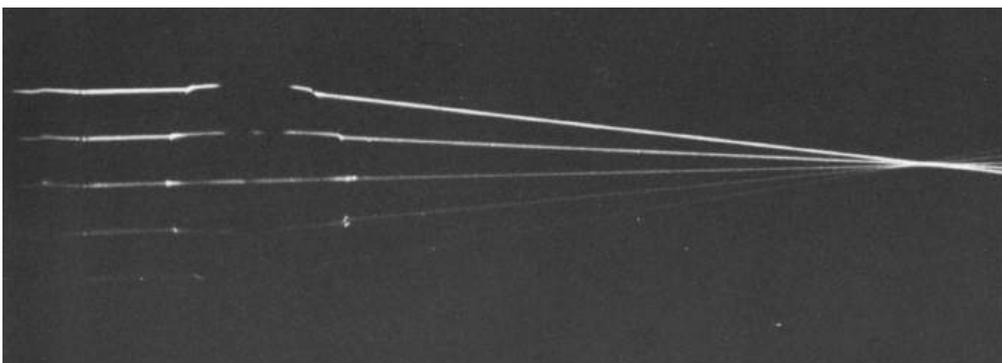


Figura 1.11. Método de trazado de rayos donde se muestra la ausencia de aberración esférica en el cristalino de vaca [Sivak and Kreuzer, 1983].

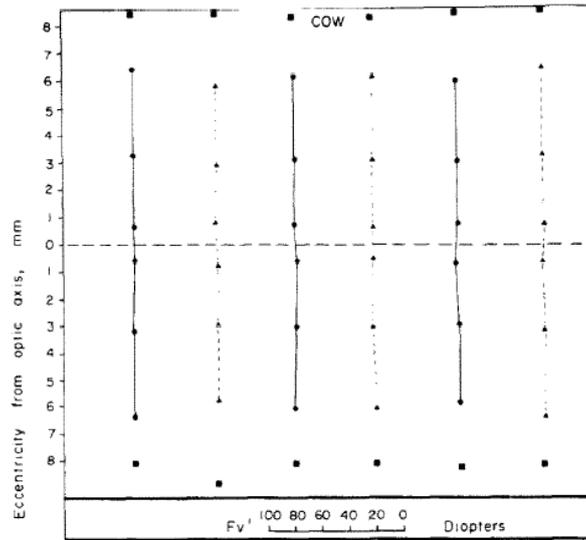


Figura 1.12. Cambio en la potencia de vértice posterior del cristalino de vaca [Sivak y Kreuzet, 1983].

Utilizando una técnica de trazado de rayos, se llegó a la conclusión de que el cristalino de vaca está libre de aberración esférica (Figuras 1.11 y 1.12) [Sivak y Kreuzer, 1983]. Para la potencia de vértice posterior obtuvieron un valor de 36.4 D. Las variaciones en distancia focal posterior no superaron el 6% entre el centro y la periferia (Figura 1.12). Aunque las medidas están hechas en un único meridiano, los autores añaden que en el caso de pupilas no circulares las asimetrías meridionales del cristalino pueden ser importantes a la hora de combinarse con las aberraciones (fundamentalmente la esférica) de la córnea.

La aberración cromática longitudinal se define como el cambio de potencia de un sistema óptico con la longitud de onda (Figura 1.13). Se estudió este parámetro en el cristalino de vaca obteniendo 32.33, 32.79 y 33.34 D para 680 (rojo), 530 (verde) y 440 (azul) nm respectivamente [Mandelman and Sivak, 1983].

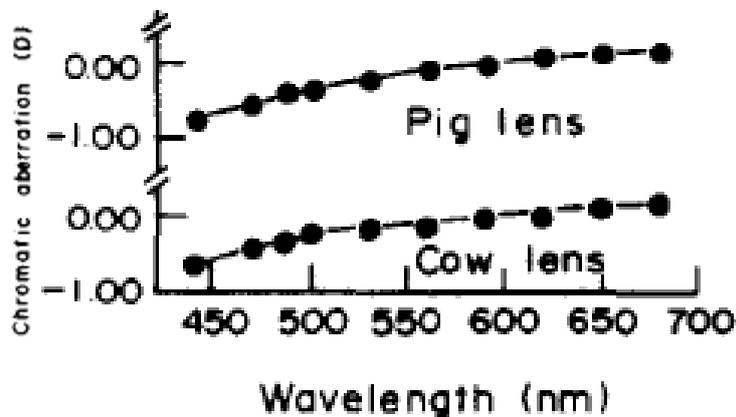


Figura 1.13. Aberración cromática en los cristalinios de una vaca y un cerdo. El eje de las abscisas indica la potencia (en D) necesaria para que el cristalino a una longitud de onda determinada tenga la misma potencia que 590 nm [Mandelman and Sivak, 1983].

Al igual que en el humano, en el bovino el cristalino también evoluciona con la edad. En este tipo de animales esta estructura ocular tiene una tasa de crecimiento rápida en etapas iniciales de la vida, tras la cual prácticamente permanece sin alteraciones [Gelatt et al., 2013]. Medidas en 23 cristalinos de vaca de edades entre 2 meses y 19 años han mostrado que el cristalino del bovino se vuelve más plano con la edad, debido a un crecimiento más rápido en el plano ecuatorial, pero la razón entre los radios de las caras anterior y posterior permanecen constantes (1.19) [Pierscionek and Augusteyn, 1992]. El radio de la primera cara pasa de 4.9 a 15 mm y el de la segunda de 4.4 a 13 mm. El índice de refracción en el plano ecuatorial aumenta hacia el centro, desde 1.38 en el cortex. El máximo índice, en el centro, aumenta con el tamaño del cristalino hasta 1.474 en el cristalino de mayor tamaño estudiado. La focal posterior aumenta también gradualmente de 24 a 51.5 mm en el rango de 0.17 a 3.04 gramos estudiado. Esto se atribuye al incremento en el radio de curvatura.

1.1.4. Cuerpo vítreo

El espacio entre el cristalino y la retina lo ocupa el humor vítreo (aproximadamente 2/3 del volumen ocular total). Es un líquido transparente y gelatinoso, similar a la clara de huevo, compuesto por agua (99%) y ácido hialurónico [Dellmann and Brown, 1976]. En el bovino adulto la longitud es de unos 19 mm y junto con la cámara anterior constituyen el 66% de la longitud axial total del ojo del bovino adulto [Freeman, 1963]. El volumen que ocupa es de 20.9 ml aproximadamente [Gelatt et al., 2013]. Medidas recientes en búfalos lo sitúan en 20.3 ± 1.7 ml [Aly and Hifny, 2013]. Al igual que la longitud axial, el espesor del cuerpo vítreo depende tanto de la edad como de la raza considerada: 14.6 mm en Frisona (61 meses), 16.2 mm en Jersey (74 meses) [Potter et al., 2008], 14.4 mm en Iranian Holstein (45 meses) [Assadnassab and Fartashvand, 2011], 13.7 mm en Angus (adulto sin especificar edad) [El-Maghraby et al., 1995] y 16.7 mm en búfalos (50 meses) [Assadnassab and Fartashvand, 2013]. Estos valores también varían de ser medidos con ultrasonidos (13.7 mm) a hacerlo de forma física sobre el globo ocular (15.6 mm) [El-Maghraby et al, 1995].

1.1.5. Retina y coroides

La retina se sitúa detrás del cuerpo vítreo. Es una estructura sensible a la luz sobre la que se forman las imágenes proporcionadas por la óptica ocular (córnea y cristalino). En bovinos tiene un espesor de unos 0.22 mm [Prince et al., 1960] y es similar a la de los ovinos [Samuelson, 1999]. Su estructura se divide en 10 capas que se extienden desde la membrana limitante interna (en contacto con el vítreo) hasta el epitelio pigmentario. Este epitelio

pigmentario está conectado con los segmentos externos de los fotorreceptores por su parte interna y con la coroides por la externa (Figura 1.14(a)). La Figura 1.14(b) muestra un corte histológico de la retina de bovino donde se pueden apreciar las diferentes capas.

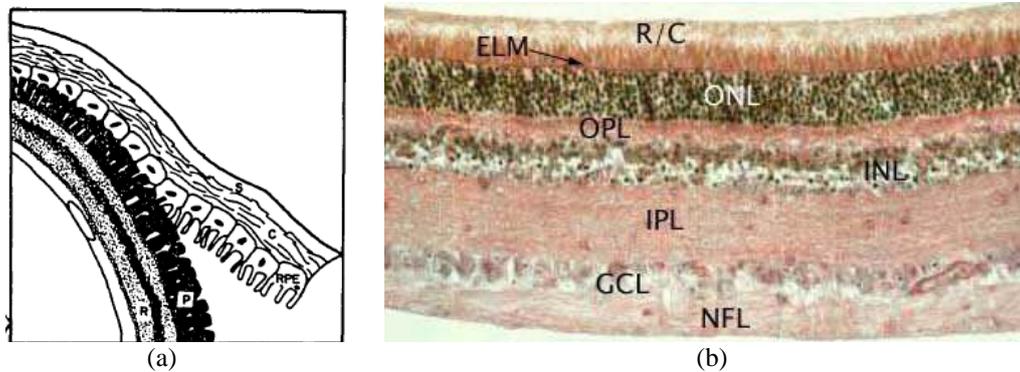


Figura 1.14. (a) Esquema de los tejidos ocular localizados en la parte posterior del globo ocular. R, varias capas retinianas; P, capa de fotorreceptores; RPE, epitelio pigmentario; C, coroides; S, esclera [Boucher et al., 1986]. (b) Corte histológico teñido de una retina de bovino [Aly, 2003]. R/C, conos y bastones; ELM, membrana limitante externa; ONL, capa nuclear externa; OPL, capa plexiforme externa; INL, capa nuclear interna; IPL: capa plexiforme interna; GCL, capa de células ganglionares; NFL, capa de fibras nerviosas.

Las células fotorreceptoras retinianas son de dos tipos: conos y bastones (Figuras 1.15(a) y 1.15(b)). En la retina del bovino la presencia de bastones sobre conos es claramente dominante (15:1). Los segmentos externos de los conos tienen 3-4 μm de longitud y 0.8 μm de diámetro medio. Los de los bastones tienen 7-10 μm de longitud y 1-2 μm de diámetro [Cohen, 1969; Mason et al., 1973]. Mientras que la función de los conos es la visión del color y los detalles con niveles altos de luz (condiciones fotópicas), los bastones operan cuando la iluminación es baja (condiciones escotópicas o *dim illumination*). Es por ello que los animales que son activos durante la noche presentan un menor número de conos que los que desarrollan su actividad principalmente de día [Dyce et al., 1987]. En la retina del bovino la zona central tiene una densidad de conos mayor que la periférica, aunque menor que la que corresponde a otros mamíferos [Mason et al., 1973].

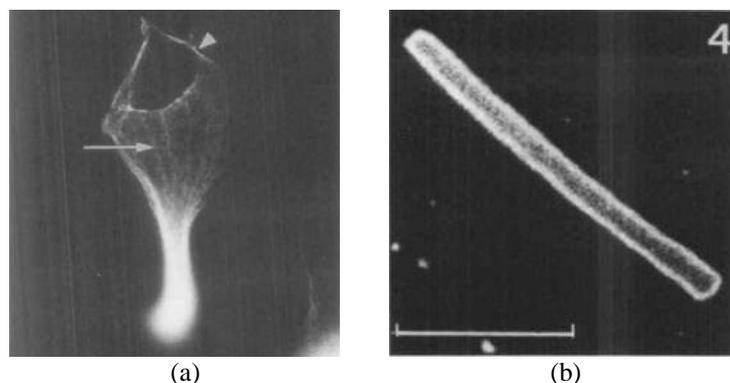


Figura 1.15. (a) Cono (aumento $\times 1055$) [Johnson and Hogemon, 1991] y (b) bastón de una retina de bovino (barra: 10 μm) [Bridges, 1981].

Dependiendo del tipo de mamífero, el fotopigmento de los conos puede ser sensible a uno, dos o tres rangos de longitudes de onda [Cohen, 1969]. La información visual recogida por la retina es transportada al cerebro a través de la cabeza del nervio nervio óptico o papila. En los bovinos ésta papila tiene forma de óvalo horizontal (aproximadamente 4.2x2.9 mm) [Gelatt et al., 2013], aunque tiende a tomar una forma circular con la edad del animal. Está situada a 3 mm del polo posterior del ojo, en dirección hacia la zona medial y fuera del *tapetum lucidum* o área tapetal (Figura 1.16). La zona “no tapetal” o retina inferior está situada por debajo del nervio óptico y tiene un aspecto uniforme y un color más oscuro.

El patrón de los vasos sanguíneos que surcan la retina del bovino es holangiótico [De Schaepdrijver et al., 1989], es decir, no hay arteria central, sino que tres (y ocasionalmente cuatro) pares vena-arteriola la drenan (véase Figura 1.16).

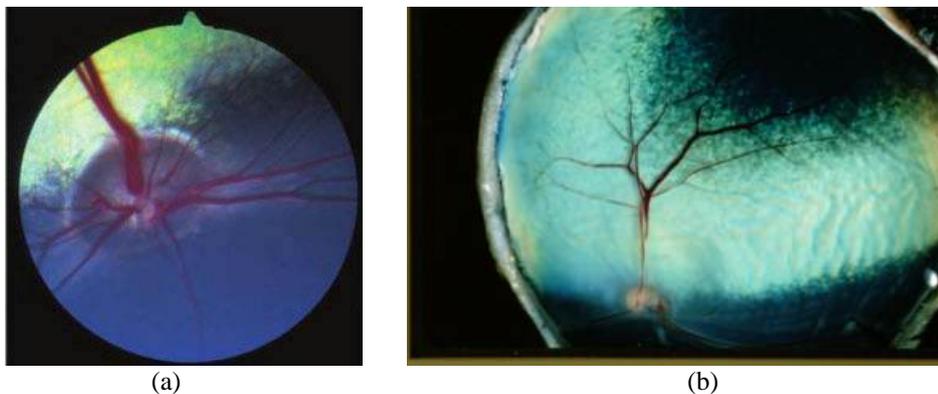


Figura 1.16. (a) Fondo de ojo en un bovino *in vivo* [Gelatt et al., 2013] y (b) postmortem (cortesía del Prof. J. M. Vázquez-Autón) donde se puede apreciar la papila y los capilares que en ella confluyen, así como el *tapetum*.

Entre el epitelio pigmentario y la esclera se encuentra la coroides (Figura 1.14(a)), una estructura muy pigmentada y muy vascularizada. En la mitad superior del fondo del ojo (parte dorsal) la coroides del bovino posee un área triangular hiper-reflectiva conocida como *tapetum lucidum* (o porción tapetal de la retina). Las longitudes medias de los lados son 55.8, 32.2 y 39.6 mm [Gelatt et al., 2013]. La base del triángulo yace por encima de la cabeza del nervio óptico. El *tapetum* es una capa avascular, celular en carnívoros y fibrilar en herbívoros, cuyas propiedades de reflexión hacen que brille cuando se le ilumina. La estructura fibrilar reduce su espesor hacia la periferia (de 50 a 10 μm) y está compuesta por fibras de colágeno y algunos fibroblastos [Samuelson, 1999]. Esta capa no existe en humanos y se cree que se utiliza para la adaptación nocturna, puesto que la luz que refleja aumenta la estimulación de los fotorreceptores y ayuda a la adaptación a la oscuridad [Dyce et al., 1987]. Las propiedades de reflexión podrían ser resultado de un proceso de difracción de la luz en las fibras de

colágeno que tienen un tamaño aproximado de 80 nm y una disposición muy regular similar a la del estroma corneal [Samuelson, 1999].

Aunque la retina de los bovinos parece no poseer una mácula morfológicamente definida [Gelatt et al., 2013], hay algunos autores que localizan una mácula temporal y una central, como se indica en la Figura 1.17(a) [Dimberton, 1999]. Otros afirman que la parte central de la retina tiene una horizontal estriada (*area centralis striae formis*) situada por encima de la papila y justamente en el borde inferior del *tapetum*, entre los vasos horizontales, dorsales y ventrales (Figura 1.17(b)). Esta zona sería clave para la visión monocular o de movimientos, y permitiría al animal “ralentizar” los movimientos observados imperceptibles al ojo humano [Ferret, 2005]. Además existe una zona redonda (*area centralis rotunda*) situada en la retina temporal que se haría cargo de la visión binocular central prácticamente sin convergencia ocular.

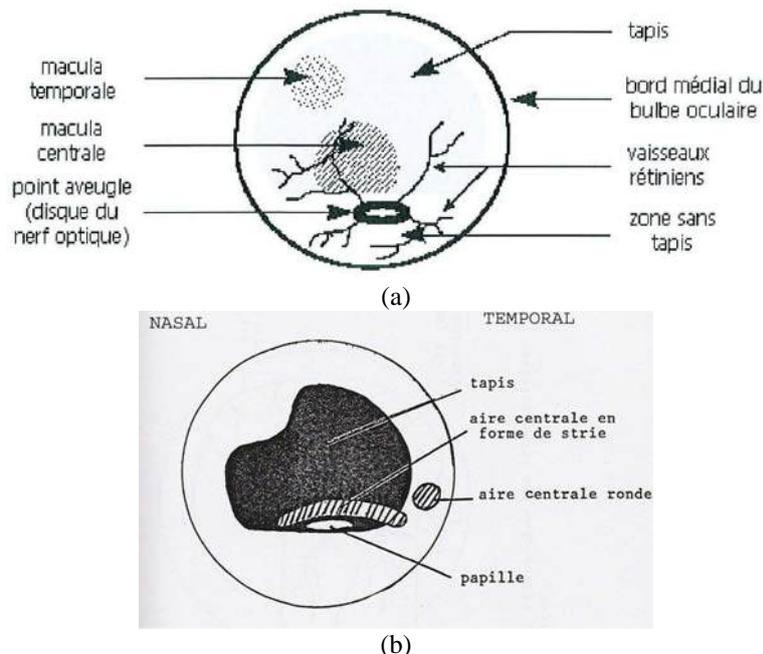


Figura 1.17. Esquemas de la retina de un bovino donde se localizan las máculas : (a) [Dimberton, 1999]; (b) [Ferret, 2005].

En todos los ungulados, y en los bovinos en particular, la mayor densidad de células ganglionares se extiende a lo largo de la línea horizontal central (*horizontal visual streak*), por encima de la cabeza del nervio óptico, donde se sitúa la mácula central estriada. En la Figura 1.18(a) se muestran las líneas de isodensidad de células ganglionares en la retina del bovino. Esta densidad es máxima en la zona temporal [Hebel, 1976], donde el tamaño de las células es menor (Figura 1.18(b)) [Hebel and Holländer, 1979]. El valor máximo encontrado fue de 6130 células/mm² [Heffner and Heffner, 1992]. Esta densidad sugiere una agudeza visual de

12.4 c/deg. La extensión de la zona donde las densidades son del orden del 75% o más del valor máximo es 132°.

Por tanto la región de máxima agudeza visual se extendería horizontalmente a lo largo de un área de unos 130° (comparado con la zona de 1° en los humanos). Debido a ello los bovinos tienen una buena visión del horizonte. Esto, combinado con el paralaje en movimiento proporciona al animal una excelente habilidad para detectar objetos en movimiento en el horizonte. Este paralaje en movimiento permite al cerebro evaluar distancias relativas en visión monocular de la siguiente forma. Cuando el animal mueve ligeramente la cabeza, las imágenes de los objetos cercanos se mueven rápidamente por la retina, mientras que las imágenes de objetos distantes permanecen prácticamente inmóviles. Obviamente este efecto no existe cuando el ojo (o los ojos) permanecen completamente quietos.

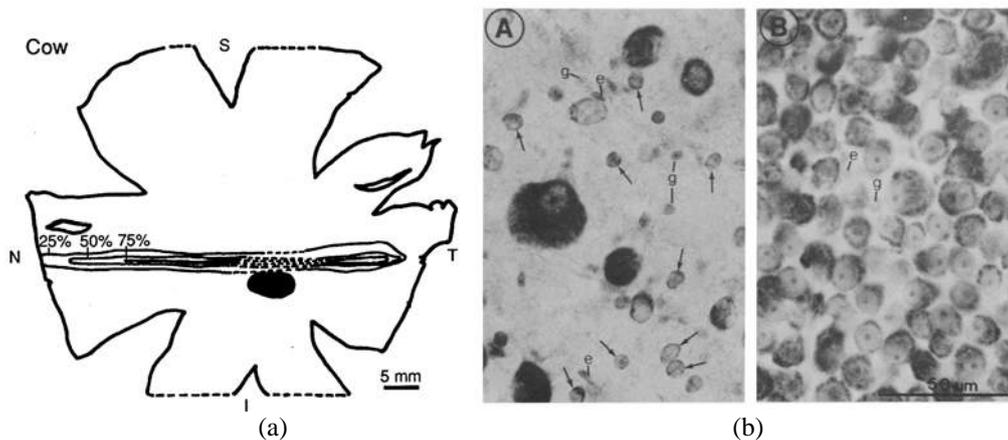


Figura 1.18. (a) Esquema de la retina de un bovino donde se indican las zonas de isodensidad de células ganglionares [Heffner and Heffner, 1992]. (b) Distribución de células ganglionares en la periferia (A) y en la zona central (B) de una retina de bovino [Hebel and Holländer, 1979]. N, nasal; T, temporal; S, superior; I, inferior.

1.1.6. Esclera

La mayor parte de la zona externa del globo ocular está ocupada por la esclera. Ésta es una capa externa fibrosa y opaca de tejido conectivo (colágeno) (Figura 1.19). En ella van insertados los músculos oculares y los capilares que penetran en el ojo. Su función es básicamente la de proteger las estructuras internas del ojo. El espesor varía dependiendo de la zona del globo ocular: 1 mm en la zona ecuatorial, 1.2-1.5 mm en la corneo-escleral y 2 mm en el polo posterior [Prince et al., 1960]. Aunque en los humanos la esclera se conoce coloquialmente como el “blanco del ojo”, en el bovino su color puede variar, pudiendo ir desde el blanco hasta un tono grisáceo [Samuelson, 1999].

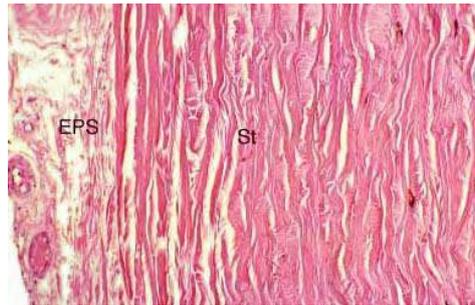


Figura 1.19. Corte histológico teñido de una esclera de bovino [Aly, 2003] donde se puede apreciar la estructura fibrosa. EPS, epiesclera; St, estroma.

1.2. Campo visual y divergencia de ejes visuales

1.2.1. Campo visual monocular y binocular

El campo visual se define como el área (expresada en grados) dentro de la cual se perciben imágenes alrededor de un objeto determinado sobre el cual se mantiene la vista fija. Dicho de otra forma: es la porción del espacio que el ojo inmóvil es capaz de captar en un momento determinado. Este campo visual puede ser monocular (un único ojo) o binocular (ambos ojos), y cada uno de ellos tendrá una extensión en el plano horizontal y otra en el vertical. En el caso del ser humano (Figura 1.20) cada ojo ve aproximadamente 150° sobre el plano horizontal, 50° nasal y 100° temporal (la superposición binocular o visión tridimensional (3D) es del orden de 120°). En el plano vertical el campo se reduce pasando a ser de 130 - 140° .

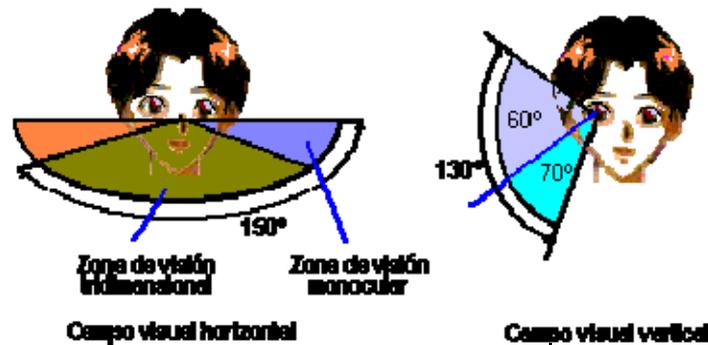


Figura 1.20. Campo visual monocular y binocular en el ser humano [http://mundovisual.galeon.com/campovis.htm].

Mientras que el campo de visión monocular depende fundamentalmente de la zona activa de la retina con presencia de células fotorreceptoras, el binocular está determinado además por cómo están colocados los ojos en la cabeza, es decir, por el ángulo de divergencia de los “ejes visuales”. Cuando la literatura habla de campo visual, se está refiriendo habitualmente a campo visual binocular (zona de solapamiento de los dos campos monoculares individuales).

Puesto que diferentes animales tienen las órbitas oculares en diferentes posiciones, éstas determinarán el área que pueden ver “sin girar la cabeza”. Los ojos de los animales no depredadores presentan una disposición lateral (Figura 1.21) con una divergencia de los ejes visuales determinada. Por el contrario, en los depredadores la posición es frontal y por lo tanto sin divergencia.

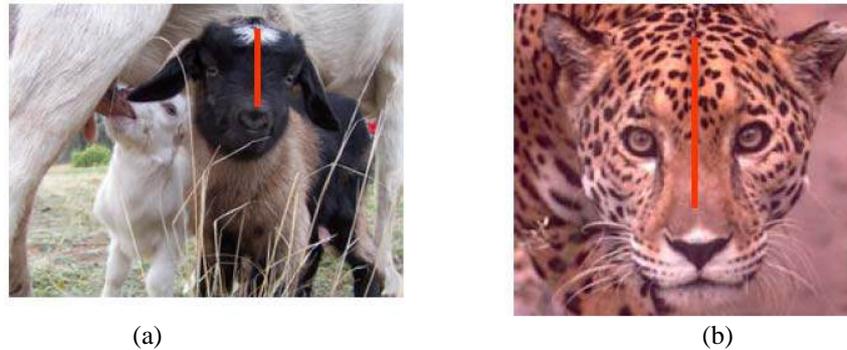


Figura 1.21. Ejemplos de animales con los ojos en posición lateral (a) y frontal (b) [<http://es.slideshare.net/Diegoeman5/estesiologa-ojo-pdf>].

Una disposición frontal da lugar a una considerable visión binocular o estereoscópica, que permite la concentración en objetos cercanos y la percepción en profundidad (visión en 3D) [Dyce et al., 1987; Heesy, 2004]. Por el contrario, la disposición lateral ayuda al animal a defenderse de los posibles depredadores pues proporciona un campo visual total mucho más amplio (panorámico), tanto en la zona lateral como en la posterior. Esta es una ventaja obvia para animales no depredadores, que les sirve de vigilancia y les asegura que cuando una amenaza se acerca por detrás pueda ser vista. Sin embargo, la visión binocular está muy limitada, del orden de una decena de grados (Figura 1.22). La Figura 1.23 compara de forma cualitativa tres campos visuales correspondientes a tres especies diferentes.

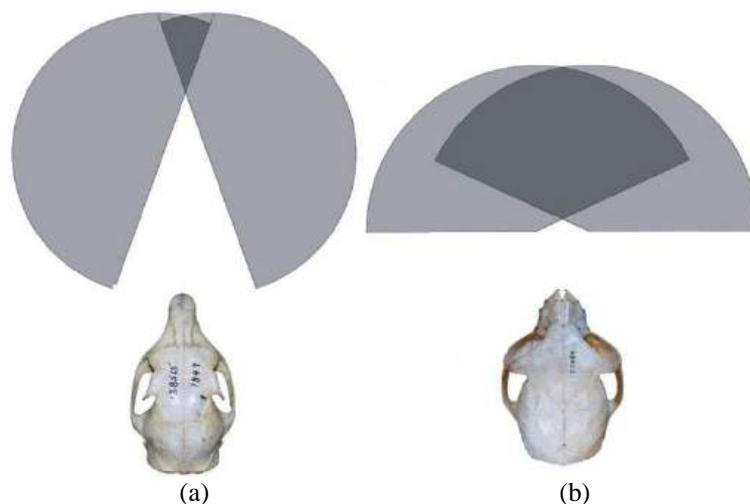


Figura 1.22. Relación entre la posición de las órbitas oculares y el campo visual. (a) Posición lateral; (b) posición frontal [Heesy, 2004].

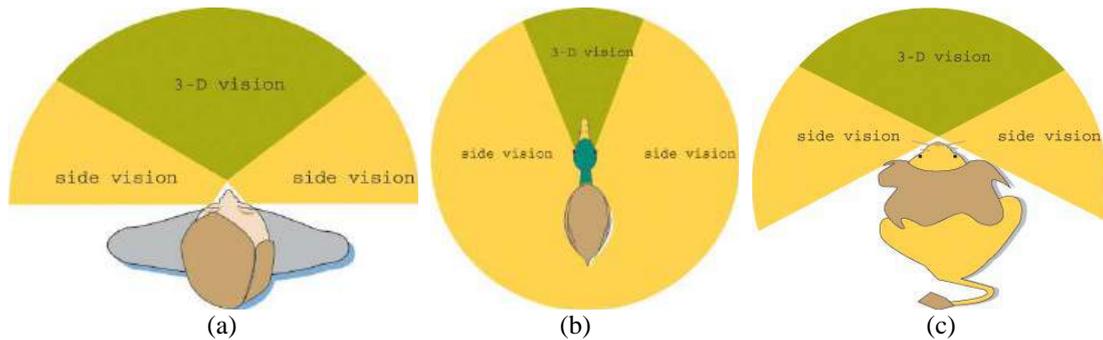


Figura 1.23. Zonas de visión monocular y binocular en depredadores y no depredadores: humano (a), pato (b) y león (c) [<http://www.aaofoundation.org/>].

El campo visual monocular en el plano horizontal es de unos 150° en la mayoría de los vertebrados y algo mayor en los peces [Land and Nilsson, 2012]. En la mayoría de los pequeños vertebrados (peces, anfibios y reptiles) la posición de los ojos es lateral con los ejes visuales formando entre 70° y 90° con respecto a la dirección frontal. Sin embargo, en los mamíferos (perros, gatos,...) y en algunos pájaros (halcones y búhos) los ejes visuales están dispuestos como en las especies depredadoras: paralelos y orientados hacia adelante. Esta disposición como ya se ha dicho les proporciona un campo visual global notablemente mayor, pero una zona extensa ciega detrás. En animales no depredadores como es el caso de ratones, conejos y ardillas los ejes visuales apuntan en direcciones prácticamente opuestas (disposición de los ojos casi completamente lateral) proporcionando un campo visual horizontal total próximo a los 360° y una visión completa del cielo que hay sobre ellos. Mamíferos herbívoros de tamaño grande (por ejemplo, el ganado bovino) que no se ven normalmente acosados por depredadores naturales tienen ejes visuales en la zona intermedia.

En un estudio en mamíferos se demostró que hay una correlación lineal significativa entre el tamaño del campo visual binocular y el ángulo que forman las órbitas oculares (véase la Figura 1.24) [Heesy, 2004]. Se confirmó así que los primates son el grupo de mamíferos con mayor campo visual binocular.

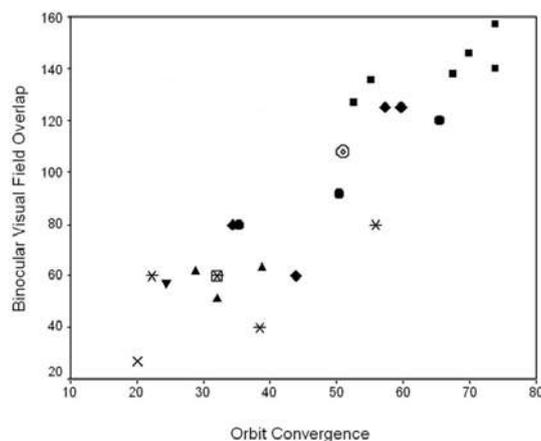


Figura 1.24. Relación entre el campo visual binocular y la convergencia de las órbitas [Heesy, 2004].

Se podría pensar que un campo visual total amplio o panorámico representa una gran ventaja, sin embargo la posición frontal de los ojos en los humanos también tiene sus ventajas. La disposición frontal ayuda a la visión en profundidad o en 3D. Debido a la diferente posición de los ojos, sobre las retinas se proyectan imágenes del objeto ligeramente diferentes. El cerebro combina dichas imágenes dando lugar a la sensación de profundidad o visión en 3D. En el ser humano esto es esencial para, por ejemplo, bajar escaleras, darle la mano alguien o coger una pelota al vuelo.

Animales con una notable visión en 3D son los leones o los monos. En los primeros, este campo visual binocular es probablemente esencial para recavar la información necesaria (resolución, distancias, iluminación,...) a la hora de capturar las presas. En los primates, que no son esencialmente carnívoros, este campo visual es la base de la visión estereoscópica que se fundamenta en la disparidad entre las imágenes que se forman en cada ojo. La Figura 1.25 muestra la divergencia de los ejes visuales y la extensión del campo visual binocular en diferentes animales [Land and Nilsson, 2012]. Se pueden consultar datos adicionales e información más precisa en el caso de mamíferos en [Hughes, 1977a], y en el caso de aves en [Martin and Katzir, 1999; Martin, 2007].

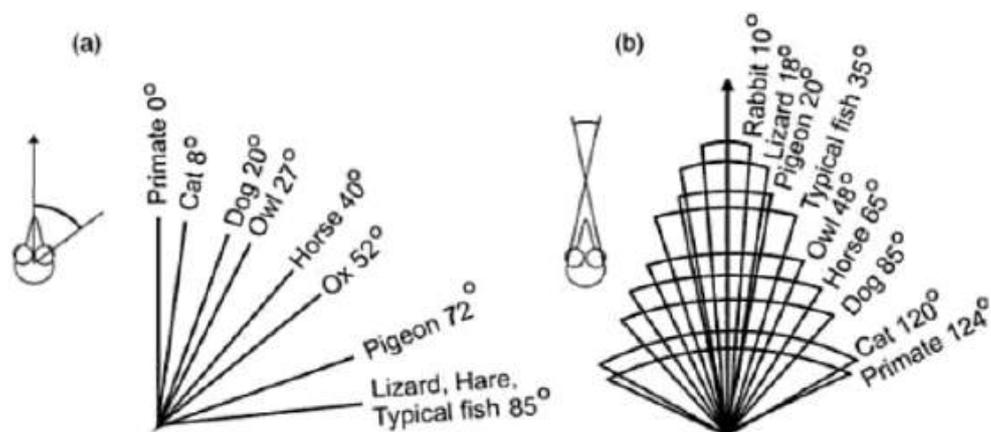


Figura 1.25. (a) Dirección del eje ocular con respecto a las línea frontal de la cabeza y (b) extensión de campo visual binocular para varios animales [Land and Nilsson, 2012].

1.2.2. Campo visual en el bovino

En 1942 Walls presentó un cuadro resumen de los ángulos de divergencia de los ejes visuales en diferentes mamíferos en condiciones *post-mortem* (Tabla 1.1). Según esto, el ángulo de divergencia de los ejes ópticos se sitúa entre los 141°24' del conejo y los 33°20' del galgo. En la vaca dicho ángulo corresponde a 113°5'. También presentó la amplitud del campo visual binocular en los mismos animales. Los valores se situaban entre un máximo de 116°20' en el perro "rattler" y los 27° del conejo. En la vaca el valor correspondía a 51°40'.

Más recientemente se ha recopilado información bibliográfica sobre más mamíferos que se muestran en la Tabla 1.2. Sin embargo, en lugar de expresar la divergencia de los ejes visuales, mostró la convergencia (90° de convergencia corresponden a 0° de divergencia).

Animal	Divergence of optic axes, post-mortem	Greatest width of binocular field	
Horse.....	127°	57°	
(Foal).....	$118^\circ 10'$	$62^\circ 40'$	
Cow.....	$113^\circ 5'$	$51^\circ 40'$	
Goat.....	103°	$63^\circ 25'$	
Dogs {	Setter.....	$44^\circ 10'$	$78^\circ 40'$
	Greyhound.....	$33^\circ 20'$	$82^\circ 40'$
	Fox Terrier.....	$52^\circ 50'$	$90^\circ 20'$
	Rattler.....	$40^\circ 20'$	$116^\circ 20'$
Guinea-pig.....	$103^\circ 25'$	$76^\circ 30'$	
Rabbit {	$141^\circ 24'$
	At rest.....	27°
	Aroused.....	32°
	Posterior binocular field.....	9°

Tabla 1.1. Ángulos de divergencia de los ejes visuales y máximo campo visual binocular en diferentes mamíferos [Walls, 1942].

Common name	n	Orbit convergence	Binocular visual field
Horse	4	$24.4^\circ (2.5^\circ)$	57°
Sheep	2	28.8°	61.7°
Cattle	4	$32^\circ (4.3^\circ)$	51°
Goat	3	$38.7^\circ (2.6^\circ)$	63°
Rat	2	32°	$40-60^\circ$
Mouse	6	$38.3^\circ (6.4^\circ)$	40°
Hamster	6	$55.8^\circ (3.5^\circ)$	80°
Squirrel (E. Grey)	4	$22.1^\circ (2.0^\circ)$	60°
Rabbit	2	20°	$27-32^\circ$
Dog	6	$50.4^\circ (5.6^\circ)$	$78-116^{oa}$
Cat	6	$65.4^\circ (5.8^\circ)$	120°
Ferret	2	35.3°	80°
Gray-headed flying fox	3	$50.9^\circ (3.8^\circ)$	108°
Marsupial cat	6	$41.6^\circ (3.5^\circ)$	125°
N.A. opossum	6	$59.8^\circ (8.3^\circ)$	125°
S.A. opossum	4	$57.2^\circ (4.9^\circ)$	125°
Brush-tailed possum	5	$59.7^\circ (2.6^\circ)$	125°
Numbat	4	$34.4^\circ (4.5^\circ)$	80°
Tammar wallaby	6	$43.9^\circ (1.9^\circ)$	60°
Fat-tailed dunnart	2	40.8°	140°
Common treeshrew	6	$32^\circ (3.4^\circ)$	60°
Bushbaby	6	$55.0^\circ (3.8^\circ)$	136°
Tarsier	6	$52.5^\circ (2.8^\circ)$	127°
Owl monkey	6	$67.5^\circ (2.0^\circ)$	138°
Squirrel monkey	6	$69.9^\circ (3.9^\circ)$	146°
Rhesus macaque	6	$73.9^\circ (7.1^\circ)$	140°
Human	2	79.3°	140°

Tabla 1.2. Ángulos de convergencia de los ejes visuales y campo visual binocular en diferentes mamíferos [Heesy, 2004].

En los bovinos la zona de visión monocular horizontal subtiende unos 130° , que se corresponde con la distribución de células ganglionares que se extienden a lo largo de esa

dirección de la retina [Heffner and Heffner, 1992]. Esto ofrece una excelente visión de los objetos colocados en el horizonte. Cuando esto se combina con el movimiento de paralaje explicado en el apartado 1.1.5, existe una excelente habilidad para detectar objetos en movimiento en el horizonte. Además, el ganado bovino usa su ojo izquierdo (ligado al hemisferio cerebral derecho) para detectar amenazas. Los objetos familiares y con ausencia de peligro son observados mejor con el ojo derecho (conectado al hemisferio izquierdo). Esto se tiene en cuenta en el diseño de instalaciones de manejo para este tipo de animales donde se suele usar el lado izquierdo [Phillips, 2002].

En cuanto a la visión en el meridiano vertical, frente a los 140° del humano, el bovino tiene unos 60° (Figura 1.26). Así, el ojo del bovino está “diseñado” para mirar hacia abajo. Si levantan la cabeza no son capaces de ver lo que está cerca de sus pezuñas.



Figura 1.26. Comparación de campos monoculares verticales en el humano y en el bovino [<http://www.dairynz.co.nz>].

Según Phillips [2002], la posición de los ojos en los laterales de la cabeza le proporciona al bovino un campo visual total de 330° (notablemente superior a los 150° del humano). Por su parte, la visión binocular está limitada (25° - 50° o 20° - 30° , según los autores [Walls, 1942; Heffner and Heffner, 1992]) y afectará a la visión en 3D principalmente la que corresponde objetos colocados cerca [Phillips, 2002]. Sin embargo tienen una zona ciega detrás de ellos como indica la Figura 1.27.

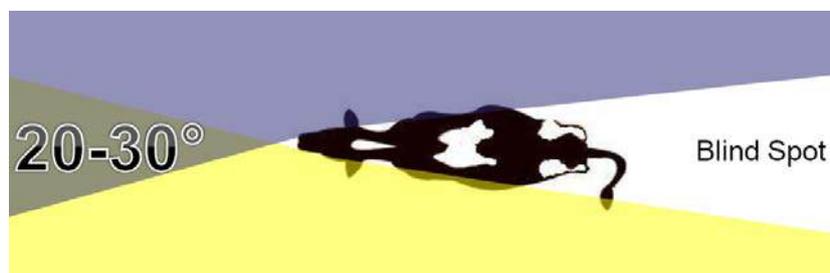


Figura 1.27. Campos monoculares (azul y naranja), binocular (gris) y zona posterior ciega (blanca, blind spot) en el ganado bovino [<http://www.dairynz.co.nz>].

Probablemente la visión estereoscópica de los bovinos está limitada a la observación de objetos cercanos. Esta les serviría para calcular distancias: objetos en movimiento pueden posicionarse por solapamiento de pistas monoculares (paralaje), y el recordar el tamaño del objeto permitirá estimar la distancia a su posición. El reconocer el peligro es probablemente más fácil si el objeto atacante se mueve y puede reconocerse y relacionarse con una experiencia previa.

La sensibilidad a bajos niveles de luz (apartado 1.1.5), la limitada percepción de profundidad y la escasa visión de detalles (véase apartado 1.3) son probablemente la razón por la cual el ganado bovino es reacio a cruzar zonas de sombra o rejillas, y se mueven con mayor facilidad en zonas de luz difusa.

1.3. Agudeza visual en bovinos

La agudeza visual (AV) es el parámetro que evalúa la capacidad del sistema visual para detectar y discriminar detalles de un objeto. Se define como la inversa del ángulo subtendido por el detalle más pequeño discernido (mínimo ángulo de resolución en minutos de arco, MAR) [Bennett and Rabbetts, 2004]. Teóricamente este ángulo está relacionado con la distancia entre dos fotorreceptores retinianos contiguos. Una AV con un valor de 1.0 implica que el ojo puede discriminar a 6 m de distancia un detalle que mide 1.75 mm. En términos de frecuencia espacial, una AV de 1.0 equivale a 30 ciclos/grado. Puesto que una mayor AV está asociada a una mejor calidad de visión, ésta es en sí una medida de la salud ocular, dado que numerosas patologías pueden causar un déficit o incluso una pérdida total de visión. En humanos la AV se mide utilizando tests subjetivos específicos (test de Snellen, C de Landolt,..) que requieren la colaboración del paciente. Sin embargo los estudios con animales requieren técnicas muy diferentes.

En el caso particular de los bovinos, se ha mostrado que son capaces de diferenciar formas simples (círculo, cuadrados, triángulos, y líneas simples y dobles) [Baldwin, 1981; Rehkämper and Görlach, 1997]. Tests de comportamiento en vacas jóvenes de la especie “Japanese Black” (14-16 meses de edad) presentaron valores de AV aproximadamente 20 veces más pequeños (entre 0.045 y 0.083) que los correspondientes a humanos [Entsu et al., 1992]. En un único animal se calculó de forma indirecta la AV utilizando la densidad de células ganglionares de la retina [Heffner and Heffner, 1992]. Se obtuvo un valor de 12.4 ciclos/grado para la frecuencia espacial, que corresponde a 0.41 de AV. También se han realizado experimentos utilizando pruebas psicofísicas en tres animales adultos (dos

Holstein Friesian y una Red Holstein) para medir su AV [Rehkämper and Görlach, 1998]. Los animales fueron entrenados para reconocer un disco negro y después diferenciarlo de otros más pequeños (Figura 1.28). Los animales fueron capaces tanto de aprender como de recordar lo que habían aprendido. El mínimo ángulo visual medido fue de 23', lo que implica una AV de 0.043. Además, puesto que los animales tenían más de 3 años de edad, los autores afirmaron que era posible que la AV en el bovino disminuyera con la edad.

Experimentos adicionales posteriores mostraron que los bovinos distinguen mejor los detalles verticales que los horizontales, lo cual podría estar relacionado con la forma de la pupila [Rehkämper et al., 2000]. Los mínimos ángulos resueltos fueron respectivamente 23' y 37' (0.043 y 0.027 de AV).

Mientras que los humanos tienen una zona de 1° donde la AV es máxima debido a la alta densidad de fotorreceptores (conos en particular), en los bovinos esta zona se extiende hasta 130° y la densidad de sus células fotorreceptores es mucho menor [Phillips, 2002].

Estos experimentos citados no tuvieron en cuenta la refracción ocular de los animales (véase apartado 1.4). A pesar de su baja AV (compensada con el sentido del olfato [Phillips, 2002]), la habilidad de estos animales para ver y utilizar pistas visuales, tales como formas y tamaños, sugiere que el sistema visual es importante en la biología y desarrollo de los bovinos.

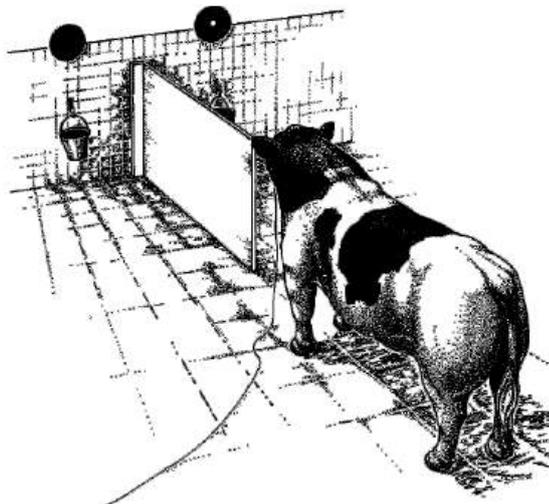


Figura 1.28. Experimento para medir la AV en bovinos [Rehkämper and Görlach, 1998]. El muro que separa los dos discos mide 1.5 m de largo y 1 m de alto.

Sin embargo la anatomía de los ojos de los bovinos les proporciona una diferente AV para objetos fijos y objetos en movimiento [Entsu et al., 1992; Rehkämper and Görlach, 1998]. En particular, debido a la forma estriada de la retina de los bovinos, la percepción de objetos dinámicos es más detallada que en los humanos (Figura 1.29) y la visión del

movimiento está distorsionada [Dimberton, 1999]. Esta característica explicaría el miedo de los animales cuando se enfrentan a objetos que se mueven rápidamente y la necesidad del ganadero de moverse lentamente y con frecuencia delante del campo visual del animal.

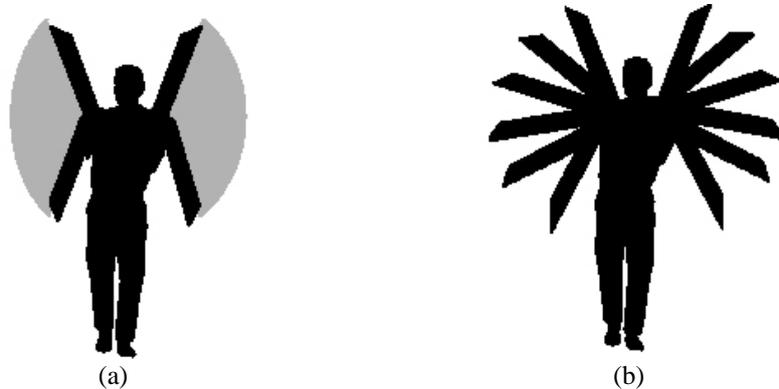


Figura 1.29. Percepción del movimiento en humanos (izquierda) y bovinos (derecha) [Dimberton, 1999]. En palabras sencillas, cuando un objeto se mueve el sistema visual bovino “registra una película”, mientras que el humano “se limita a tomar fotos”.

1.4. Refracción ocular

Desde el punto de vista óptico el ojo es un sistema sencillo similar a una cámara fotográfica. Ambos tienen un conjunto de lentes y un diafragma de apertura con dimensiones variables. Además, la retina del ojo y la CCD (antes película fotográfica) realizan funciones similares, pues ambos registran la imagen formada por el sistema de lentes. Este sistema de lentes está compuesto por cuatro superficies (véase apartado 1.1) que separan medios de diferente índice de refracción (n). Para llegar a la retina los rayos de luz pasan del aire ($n=1.00$) a la córnea ($n=1.38$), de ésta al humor acuoso ($n=1.33$), luego al cristalino ($n=1.40$ de media) y finalmente del cristalino al humor vítreo ($n=1.34$). Cada vez que la luz pasa de un medio a otro sufre refracción (el rayo cambia de dirección) aunque la mayor se produce en la primera superficie de la córnea (interfase aire-córnea).

Para poder estudiar el comportamiento óptico del ojo, tanto humano como de animales, ha sido necesario desarrollar modelos que simplificasen ese complejo sistema. Entre ellos el más sencillo (y famoso) es sin duda el modelo de “ojo humano reducido” [Bennet and Rabbetts, 2004], donde se representa el ojo como un único dioptrio simple que separa el aire de un medio de índice $n=4/3$. Esto determina una potencia ocular total de 60 D. Con estos parámetros la imagen de un objeto alejado (en el infinito) se formará en el punto focal imagen, F , situado 22.2 mm detrás del dioptrio que actúa como córnea (Fig. 1.30).

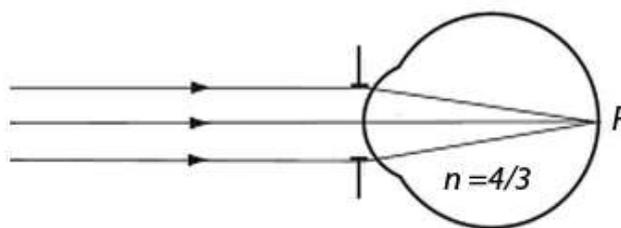


Figura 1.30. Modelo de ojo humano (emétrepe) reducido formado por un único dioptrio que separa el aire de un medio con índice de refracción $n=4/3$.

1.4.1. Tipos de ametropía ocular

Un ojo se dice que es emétrepe cuando, con acomodación relajada, la imagen de un objeto situado al infinito se sitúa sobre la retina (Figura 1.31). En ese caso se dice que el estado refractivo ocular (ERO) es nulo o que la refracción es cero ($R=0$). Cuando por alguna razón dicha imagen no se coloca sobre la retina, el ojo presenta una ametropía o un error refractivo. El caso más sencillo es la denominada ametropía esférica que hace que la imagen de un objeto en el infinito se forme delante o detrás de la retina. En el primer caso estaríamos ante un ojo miope y en el segundo ante un hipermétrope (Figura 1.31).

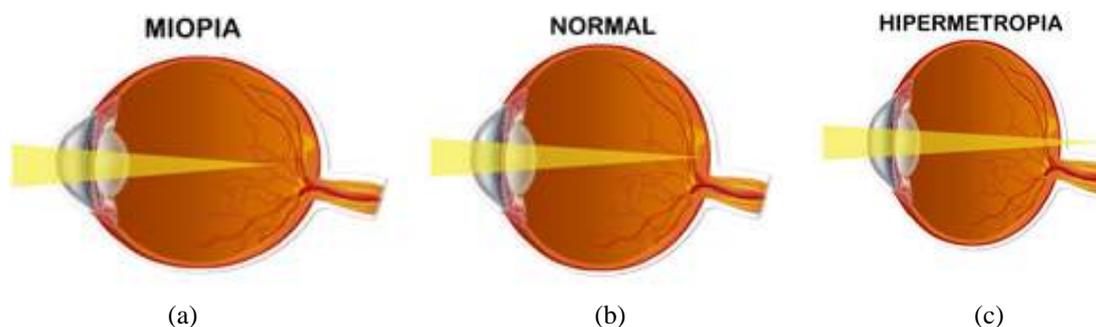


Figura 1.31. Esquemas de un ojo miope (a), emétrepe (b) e hipermétrope (c) [<http://centrocirugiaocular.com>].

La miopía habitualmente tiene lugar cuando el ojo presenta una longitud axial excesiva comparada con su potencia refractiva. En este caso los objetos lejanos no se verían bien (por estar desenfocados sobre la retina) pero sí los colocados a distancias cercanas cuando se haga uso de la acomodación. El inverso de la distancia en metros al punto más lejano a partir del cual los objetos se ven nítidos se denomina refracción y en ojos miopes es negativa ($R<0$). Para la corrección de la miopía se utilizan lentes divergentes (con potencia negativa).

Por el contrario, en un ojo hipermétrope la longitud axial es normalmente más pequeña que lo que correspondería a su potencia ocular. Así, la imagen de un objeto situado al infinito se colocará detrás de la retina (Figura 1.31) y la refracción será positiva ($R>0$). En estado desacomodado, los ojos hipermétropes tampoco tienen una visión nítida de los objetos alejados. Sin embargo pueden utilizar la acomodación como compensación natural de su refracción, puesto que dicho mecanismo añade potencia positiva al ojo. Esto hace que a partir

de cierta “distancia cercana” los objetos no se puedan ver tampoco nítidos. La hipermetropía se corrige con lentes convergentes (potencia positiva).

La otra ametropía también muy común es el astigmatismo. Un ojo astigmático tiene diferente potencia óptica dependiendo del meridiano considerado. Debido a ello los rayos procedentes de un objeto alejado no convergen todos en el mismo punto. La mayor parte del astigmatismo de un ojo radica en la falta de simetría (pérdida de esfericidad o presencia de toricidad) de la córnea. En palabras sencillas, la córnea de un ojo astigmático en lugar de tener forma esférica, tendría forma de “pelota de rugby”.

Un sistema óptico astigmático presenta dos meridianos principales con dos potencias diferentes que dan lugar a dos imágenes del mismo objeto (Figura 1.32). Estas dos imágenes pueden estar colocadas delante (astigmatismo miópico compuesto), detrás (astigmatismo hipermetrópico compuesto) o a ambos lados de la retina (astigmatismo mixto). También puede ocurrir que solamente uno de los meridianos sea amétrope (astigmatismo simple). De un objeto puntual, un sistema astigmático proporciona dos imágenes en forma de segmento alargado formando 90° con el meridiano que las produce (si el meridiano es el vertical la imagen de un punto será un segmento horizontal). El denominado círculo de mínima confusión corresponde a una zona colocada entre ambos focos astigmáticos que proporciona la imagen más paraxial posible: una mancha circular en lugar de un punto imagen. Esta sería la “mejor imagen” que puede proporcionar un sistema óptico astigmático. El astigmatismo se corrige habitualmente utilizando lentes tóricas.

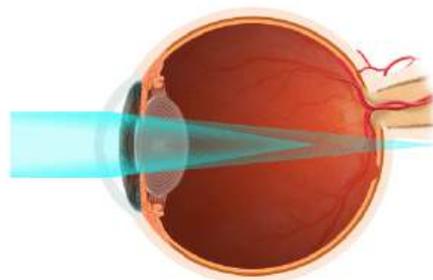


Figura 1.32. Esquema de un ojo astigmático [<http://www.stanfordchildrens.org/>].

Por tanto la potencia de la óptica ocular (córnea y cristalino) y la ubicación de la retina (o alternativamente, la longitud axial ocular) determinan el ERO del ojo. El estudio del ERO en el ser humano es una práctica común por parte de los ópticos-optometristas [Elliot, 2003]. Aunque los valores de refracción presentan una gran variabilidad en humanos, la situación más común es la miopía [McCarty et al., 1997].

1.4.2. Medida de la refracción: Concepto de retinoscopía

Aunque la medida del ERO se puede llevar a cabo de diferentes formas, una de las más extendidas (y que utilizaremos en este trabajo) es la retinoscopía de franja (o esquiascopia). La retinoscopía es un método objetivo que utiliza la reflexión retiniana para evaluar tanto la ametropía esférica como la cilíndrica (astigmatismo) interpretando la luz reflejada en la retina al ser iluminada.

Aunque la primera descripción de la reflexión retiniana en forma de una línea de sombra se debe a Bowman en 1859, fue Cuignet quien empezó a utilizarla para medir el estado refractivo del ojo en 1873. Posteriormente Parent, en 1880 combinó el retinoscopio con lentes para determinar el error refractivo. Ya en 1926 Copeland patenta el retinoscopio de franja, un instrumento que desde entonces lo han venido utilizando tanto ópticos-optometristas como oftalmólogos [Furlan et al., 2011]. A día de hoy es el instrumento más sencillo para la determinación objetiva de la refracción ocular.

El principio básico de la retinoscopía es considerar el ojo como un sistema óptico de potencia desconocida utilizando las sombras pupilares reflejadas desde el fondo ocular, que se comporta como un espejo cóncavo, para determinar su estado refractivo (o ametropía). Un retinoscopio se compone de un cabezal que incluye una fuente de luz, una lente condensadora, y un espejo, y un mando para sostenerlo (Figura 1.33). El espejo puede ser plano o esférico, aunque en este trabajo se ha utilizado siempre el plano y todo lo que se describe a continuación será solamente válido para esta configuración. Dicho espejo puede tener un orificio en la parte central o ser un espejo semi-transparente de manera que el observador pueda evaluar el ojo del sujeto examinado a lo largo de la dirección del haz luminoso producido por el retinoscopio.

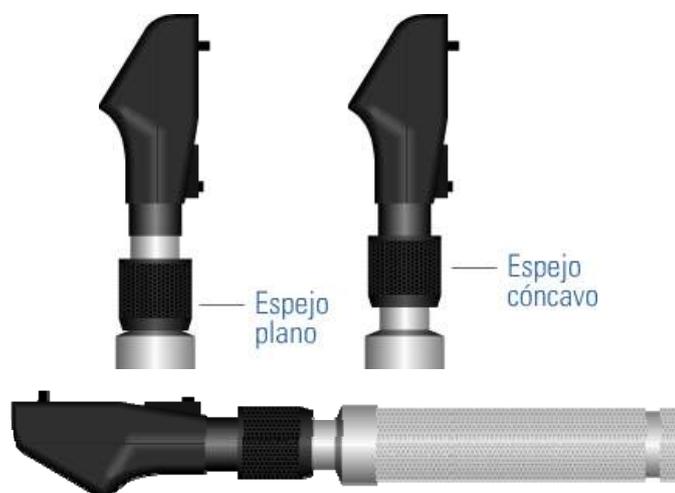


Figura 1.33. Retinoscopio.

El instrumento proyecta un haz de luz (franja) que entra en el ojo a examinar. El operador lo mueve vertical y/o horizontalmente mientras observa el movimiento del correspondiente reflejo pupilar. El sentido del movimiento de la imagen con respecto al movimiento del retinoscopio nos indica si las lentes a colocar han de ser positivas o negativas, o dicho de otra forma, si en esas condiciones de medida el ojo es miope o hipermetrope. Seguidamente se va introduciendo lentes (bien positivas bien negativas) delante del ojo, hasta que el movimiento del reflejo se neutraliza. La potencia de la lente que neutraliza el movimiento del reflejo es una medida del error refractivo del ojo estudiado.

Supongamos que colocamos la franja luminosa en posición vertical para poder estudiar el meridiano horizontal (MH) (Figura 1.34). En ese caso, moviendo ligeramente el retinoscopio a lo largo de la dirección horizontal pueden darse las siguientes situaciones:

1. El reflejo se mueve en el mismo sentido que el retinoscopio (Figura 1.34(b)). En este caso hay que añadir lentes esféricas positivas (normalmente en pasos de +0.25 D) para neutralizar el movimiento, pues se trata de un ojo hipermetrope.
2. El reflejo se mueve en sentido contrario (Figura 1.34(c)). En este caso el ojo es miope y habrá que añadir lentes esféricas negativas para neutralizar el movimiento.
3. Si con un ligero movimiento el reflejo desaparece (Figura 1.34(d)) significa que el ojo a medir es emétrope.

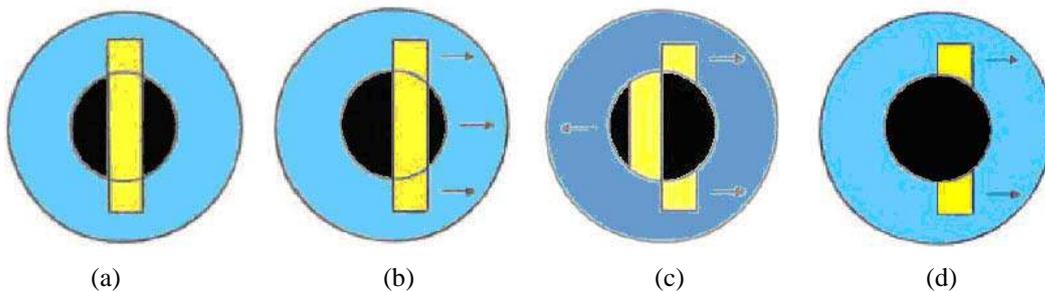


Figura 1.34. Esquema del proceso de medida con un retinoscopio para el MH (con una rendija vertical). (a) Imagen inicial; (b) hipermetropía; (c) miopía; (d) emetropía.

Independientemente del movimiento, al añadir lentes esféricas para neutralizar, la franja imagen se va a ir ensanchando como se muestra en la Figura 1.35. El objetivo es lograr que ésta cubra toda la pupila y al mover el retinoscopio solamente se vea una iluminación completa de la pupila. La potencia de la lente correspondiente a esta neutralización es la refracción bruta del MH, que tiene en cuenta la distancia de trabajo entre el ojo del paciente y el retinoscopio (habitualmente 67 cm). Para obtener la refracción neta hay que restarle +1.50 D (inverso de la distancia de trabajo).

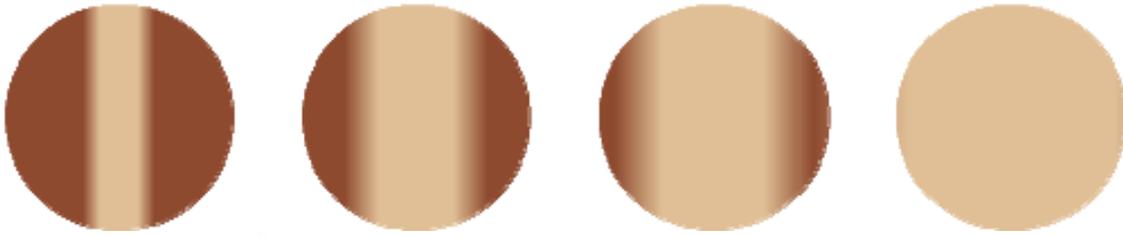


Figura 1.35. Proceso de neutralización en retinoscopia [http://saludvisual.info].

Una vez hecho esto, se puede calcular la refracción en el meridiano vertical (MV) evaluar el astigmatismo dejando las lentes esféricas añadidas, rotando la franja del retinoscopio a una posición horizontal y operando de la misma manera. Así, moviendo ligeramente el retinoscopio en dirección vertical puede ocurrir lo siguiente (Figura 1.36):

1. No hay alteraciones. No habría entonces astigmatismo.
2. El reflejo se mueve en sentido opuesto al movimiento del retinoscopio (Figura 1.36(b)). En ese caso el meridiano vertical es más potente que el horizontal (más miope). El ojo presenta el denominado astigmatismo según la regla, y para la compensación de la ametropía se necesita añadir lentes cilíndricas negativas.
3. El reflejo se mueve en el mismo sentido (Figura 1.36(c)), en cuyo caso el meridiano horizontal es menos potente y se tiene un caso de astigmatismo contra la regla. Se precisa entonces de lentes cilíndricas positivas para corregir la ametropía.

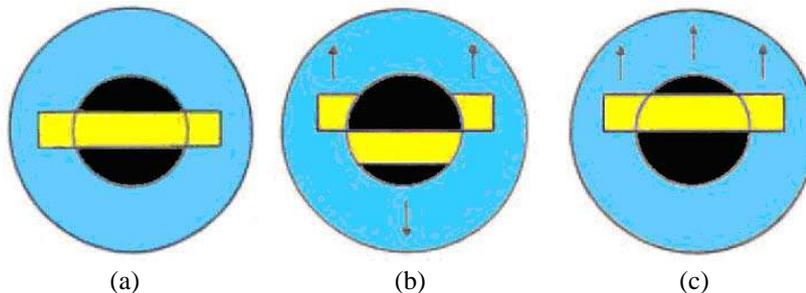


Figura 1.36. Esquema del proceso de medida con un retinoscopio para el MV tras medir el MH. (a) Imagen inicial; astigmatismo según (b) y contra (c) la regla.

1.4.3. Medida de la refracción en modelos animales

Aunque los modelos animales no son estrictamente comparables a los seres humanos, el análisis del ERO puede proporcionar información adicional sobre la función y desarrollo del sistema visual, y ayudar a entender los procesos de emetropización. Dado que el tamaño del globo ocular y la estructura de la retina difieren entre humanos y animales, la misma cantidad de ametropía también podría proporcionar diferentes efectos visuales y tener algún impacto en el comportamiento animal. El ERO en animales se ha medido con retinoscopia [Corboy, 2003] o foto-refracción [Schaeffel et al., 1987]. Algunos autores también han calculado los

valores de refracción directamente a partir de los coeficientes de Zernike del frente de onda obtenidos con un sensor de Hartmann-Shack [García de la Cera et al., 2006].

Han sido muchos los animales en los que se ha medido ERO, yendo desde los mamíferos más grandes como el elefante [Murphy et al., 1992a], el rinoceronte [Howland et al., 1993] o el caballo [Rull-Cotrina et al., 2013], hasta otros más pequeños como perros [Murphy et al., 1992b; Kubai et al., 2008], gatos [Rose et al., 1974; Konrade et al., 2012], ratas [Hughes, 1977b; Mutti et al., 1992] o conejos [Hughes and Vaney, 1978].

A pesar de que uno de los modelos animales más comunes en la visión es la de pollo [Schaeffel and Howland, 1988; Troilo and Wallman, 1991], el ERO también se ha medido en otras aves como lechuzas [Murphy and Howland, 1983], palomas [Millodot and Blough, 1971] y avestruces [Ofri et al., 2001]; en anfibios como es el caso de los sapos [Mathis et al., 1988], y en reptiles como el caso de tortugas [Henze et al., 2004].

En la Tabla 1.3 se hace un resumen de algunos de los valores de refracción en el caso de mamíferos.

Animal	Refracción (D)	Ojos (N)	Fuente
Gato	+1.14 (callejeros) -0.62 (domésticos)	46	[Rose et al., 1974]
Rata	-9.0	-	[Hughes, 1977b]
Perro	-0.27±1.41	480	[Murphy et al., 1992a]
Elefante	-0.23	12	[Murphy et al., 1992b]
Rata	[-0.12, +18.95]	96	[Mutti et al., 1992]
Rinoceronte	[+0.75,+1.5]	4	[Howland et al., 1993]
Ratón	+10.12±1.41	12	[García De la Cera et al., 2006]
Perro	-0.05±1.36	2880	[Kubai et al., 2008]
Gato	-0.39±0.85	196	[Konrade et al., 2012]
Caballo	-0.17±0.04	264	[Rull-Cotrina et al., 2013]

Tabla 1.3. Valores de refracción medidos en animales mamíferos.

1.5. El toro de lidia y la problemática visual

El toro de lidia, considerado como una subespecie del género *Bos taurus*, es un organismo herbívoro y rumiante, que ha evolucionado y aún evoluciona a nivel de grupo, población y comunidad (Figura 1.37). Se trata de un animal jerarquizado, competitivo, polivalente, en situación clímax dentro de la macro-fauna ibérica. Presenta además un nicho funcional muy concreto y específico, con una aptitud muy definida [Cruz, 1991].



Figura 1.37. Toro de lidia en la dehesa.

El nombre de este singular animal proviene de su particular aptitud zootécnica, la lidia o espectáculo donde juega el valor, la habilidad y el riesgo del hombre frente a las reacciones provocadas, el ataque y la acometividad del animal. En palabras de Uriarte: *la única fiera existente en el mundo con la que se puede lidiar frente a frente en singular combate de habilidad y no de fuerza* [Uriarte, 1969]. Esta aptitud de acometividad se denominada también, aunque con menor precisión, bravura. De ahí que existan alusiones tanto al toro de lidia como al toro bravo para referirse indistintamente a él.

La bravura, desde una concepción etológica, es la forma de expresar cada toro su patrón de comportamiento, aunque en el singular argot y léxico taurino, para algunos, pudiera tener otro tipo de acepciones como por ejemplo clase, embestida, casta ó poder [Cruz, 1991]. García Dory et al. [1990] se refieren a la única característica que se les puede asignar en común a los toros de lidia, que no es otra que su capacidad para mostrar un temperamento agresivo, que los aficionados a la fiesta de los toros denominan bravura.

Por su parte, Sánchez Belda [1984] considera que la raza es singular por una serie de circunstancias y particularidades, entre las que destaca, como inicial y principal, el criterio de su formación y perfeccionamiento, centrado en la identificación y valoración de un carácter psicológico que se ha llegado a llamar bravura. El toro bravo responde a una serie de

estímulos que le son ajenos, y a veces extraños, para poner de relieve su aptitud psicológica: la bravura a través de la lidia [Cruz, 1991].

Durante más de 250 años, se ha venido seleccionando la raza de lidia por caracteres de comportamiento mediante la aplicación empírica de técnicas genéticas [García Martínez, 2008]. Esta selección ha sido realizada unas veces mediante el arte de la intuición, otras con la sagaz observación, o con el salto al vacío en busca de una aventura genética, pero siempre con mimo y paciencia, generación tras generación [Zarazaga et al., 1984]. Independientemente del tipo zootécnico del animal, en la actualidad se emplean pruebas funcionales de campo basadas en la prueba de la tiente, acoso y derribo, retienta y observación del comportamiento en plazas de toros. Todo esto va acompañado por otra selección genealógica y morfológica, que tienen carácter temporal y que se considerarán definitivas sólo cuando se obtienen buenos resultados en la comprobación de la descendencia [García Martínez, 2008].

El toro de lidia o toro bravo, posee pues una serie de peculiaridades y características en su carácter psicológico, que hacen que sea prácticamente imposible su comparación con otras especies o razas animales. Se cría exclusivamente para que muestre su temperamento o acometividad a desarrollar durante la lidia. En este contexto el sentido de la vista en este animal es fundamental para su lidia en los espectáculos taurinos, siendo necesaria la adecuada caracterización anatómica y funcional del mismo.

El campo visual que tiene un toro de lidia es una de las incógnitas que siempre se ha planteado el mundo de la tauromaquia. Como ya se ha comentado, está determinado por la posición de las órbitas oculares y por la extensión que ocupan las células fotorreceptoras en la retina. Además, los aspectos binoculares del campo visual son de los que más discusiones han generado por ser la zona donde el animal podría tener visión en profundidad. En el toro de lidia pocos datos hay al respecto y los encontrados no describen la forma en la que se han medido por lo cual carecen del valor científico de peso necesario a día de hoy [Sanz Egaña, 1958; Martín Roldán, 1965].

Al igual que en resto de los bovinos [Ferret 2005], en el toro bravo aparece también una zona ciega frontal o zona de exclusión visual donde el animal carece de visión. Esta zona en este animal es de especial importancia en la interrelación torero-toro durante el desarrollo de la lidia. Los datos publicados sobre este parámetro en el toro de lidia no tienen excesivo valor científico y son además muy variables [Anasagasti, 1922; Sanz Egaña, 1958; Paños Martí, 1965; Martín Roldán, 1965; Daulouede, 1995].

Por otra parte, para entender la calidad y rendimiento visual toro de lidia dentro y fuera del ruedo es necesario analizar su ERO. De nuevo, los estudios de este tipo son prácticamente

inexistentes, poco precisos y contradictorios. Las contradicciones son tales que algunos autores afirma que son miopes [Sanz Egaña, 1958; Paños Martí, 1965], mientras que otros hablan de hipermetropía [Martín Roldán, 1965]. En lo que todos coinciden es que hay animales que en el ruedo muestran comportamientos anómalos asociados a defectos de la vista, que en términos taurinos se les denomina “burriciegos” [Anasagasti, 1922; Cossío, 1974].

1.6. Objetivos y estructura del trabajo

Puesto que el toro bravo está criado exclusivamente para un comportamiento optimizado durante la lidia, es de especial importancia un conocimiento en profundidad de los diferentes aspectos de su sistema visual, ya que cualquier anomalía en la visión puede mermar o inutilizar al animal para dicho cometido, y por tanto comprometer la actividad del torero durante el desarrollo de la misma. Estos aspectos englobarían, por ejemplo, el análisis del campo visual y el estudio de los posibles errores refractivos que determinan la calidad visual. Otros parámetros relacionados con las dimensiones de las estructuras oculares (y sus cambios con la edad) y la distribución de células retinianas serían también de interés.

Ante la deficiencia y/o ausencia de trabajos relacionados con este tema y de datos científicos contrastados sobre determinados aspectos del sistema visual del toro de lidia, en la presente Tesis Doctoral se han planteado los siguientes objetivos:

- Establecer las dimensiones del campo visual horizontal (monocular y binocular) en el toro de lidia.
- Valorar el tamaño de la zona de exclusión visual y relacionarlo con la edad de animal.
- Analizar la relación entre el campo visual, la zona de exclusión visual y aspectos claves de la tauromaquia.
- Determinar el ERO del toro lidia y compararlo con el del ganado manso.
- Valorar la posible relación entre el ERO y el comportamiento del animal en el ruedo.
- Estudiar los cambios en la longitud axial ocular con la edad del animal.
- Analizar la distribución de células fotorreceptoras retinianas en la dirección vertical.
- Estimar la resolución visual anatómica a partir de la inter-distancia media entre células fotorreceptoras.

Para cubrir estos objetivos el presente trabajo se estructura en 5 capítulos que se describen continuación.

En el **Capítulo 1**, de carácter introductorio, se ha presentado una revisión bibliográfica sobre la estructura y anatomía del ojo del bovino. Se ha definido el concepto de campo visual y expuesto los datos correspondientes al bovino encontrados en la literatura. También se han revisado las nociones básicas sobre los errores refractivos y la forma de medirlo utilizando un retinoscopio. En la última parte del capítulo, se ha planteado la problemática de los defectos en la visión en el toro bravo.

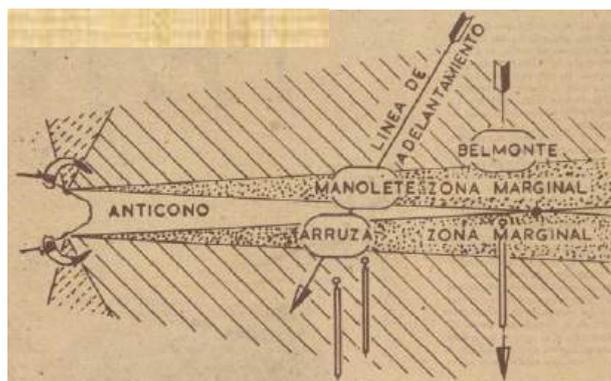
El **Capítulo 2** presenta los resultados sobre el campo visual horizontal del toro de lidia en función de la edad del animal. Estos engloban, entre otros, el análisis de parámetros como las dimensiones de la zona de exclusión visual y la extensión del campo binocular.

En el **Capítulo 3** se presentan los resultados sobre el ERO. Se ha estudiado en condiciones *post-mortem* y en vivo. También se comparan los valores obtenidos en el toro de lidia con los del ganado manso.

El **Capítulo 4** analiza las dimensiones del ojo en función de la edad del animal. Además, se ha estudiado la distribución de células fotorreceptoras retinianas y se ha estimado la resolución visual anatómica con instrumentos de última generación.

En el **Capítulo 5** se exponen las principales conclusiones de este trabajo.

Campo Visual



CAPÍTULO 2

Campo Visual en el Toro de Lidia

2.1. Introducción

La visión es uno de los elementos más importantes en la calidad de vida de los seres humanos y de los animales [Bennett and Rabbetts, 2004; Land and Nilsson, 2012]. Consta de tres etapas (óptica, retiniana y neuronal) que han de funcionar de forma coordinada para que el proceso de la visión se lleve a cabo de forma satisfactoria. Dejando a un lado las posibles interpretaciones que el cerebro pueda hacer de las imágenes que llegan a la retina, estas habilidades están fundamentalmente determinadas por dos factores: el campo visual y el ERO. El primero aporta información sobre la zona del espacio que el animal puede ver sin girar la cabeza, es decir, lo que ve con cada uno de los ojos individualmente (campo o visión monocular) y con ambos en conjunto (campo o visión binocular). El segundo indica si las imágenes que proporciona la óptica ocular son nítidas (se forman sobre la retina) o están desenfocadas (se forman delante o detrás) y se tratará en el Capítulo 3.

La medida del campo visual ha sido uno de los aspectos fundamentales a tener en cuenta en la caracterización del sistema visual de mamíferos y aves. Como ya se indicó en el apartado 1.2, su extensión está estrechamente ligada a la posición de los ojos en la cabeza del animal y depende tanto del entorno o hábitat en el que vive, como de la forma de alimentarse. Tal es así que los depredadores suelen presentar una disposición frontal (como ocurre en el perro, el león o el humano), mientras que en los no depredadores (fundamentalmente herbívoros, como es el caso de los bovinos) la disposición es lateral, como se puede apreciar en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Posición lateral de los ojos en el ganado bovino.

En este sentido, desde los años 40 del siglo pasado la literatura muestra datos tanto sobre la extensión del campo visual, como sobre la divergencia de los ejes visuales de los ojos del ganado bovino manso (véanse [Wall, 1942] y [Hughes, 1977a] como referencias clásicas). Sin embargo, en la mayoría de las publicaciones los datos ofrecidos son muy variables y no queda claro ni el método de medida, ni la precisión de éste. Si nos centramos en un animal tan particular como es el toro de lidia, la información es mucho más escasa y hasta donde el autor de esta Tesis Doctoral conoce, no existen datos rigurosos sobre este tema en el ganado bravo.

Históricamente ha habido multitud de discusiones y debates sobre las habilidades visuales del toro de lidia, tanto desde el punto de vista del campo visual como de su ERO. Todo esto se ve potenciado porque se desconoce si su visión simultánea con los dos ojos (es decir, su binocularidad) es decisiva en el arte del toreo o hay alguna zona definida donde la percepción en 3D determina su comportamiento. La información sobre este tema, además de escasa y con poca base científica, ha ido pasando por la comunidad taurina “de generación en generación” dando muchas cosas por sentadas, cuando en realidad no se tiene constancia de medidas rigurosas con criterios de calidad que puedan cumplir con los estándares científicos del siglo XXI.

Posiblemente uno de los primeros datos sobre el campo visual en el toro de lidia sean los de Sanz Egaña, que refiriéndose a un trabajo anterior de Bressou establece el campo visual horizontal en 205° (100° del eje visual hacia delante y 105° hacia atrás) y el binocular en 78° [Sanz Egaña, 1958]. Con más detalle y algunos esquemas Martín Roldán (Figura 2.2) reporta un campo monocular de 115° , uno binocular de 20° y una zona ciega posterior de unos 110° [Martín Roldán, 1965]. Estos parámetros fueron también dados por válidos por Walter Johnston (Figura 2.3) [Johnston, 2000].

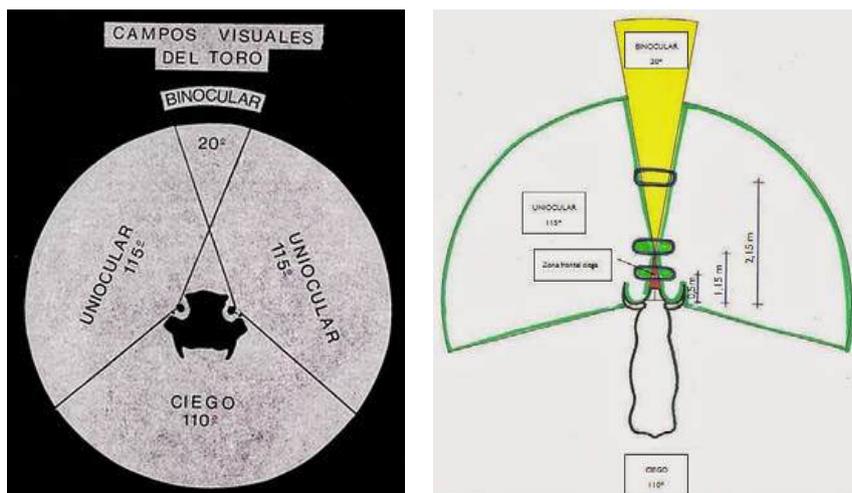


Figura 2.2. Campos visuales en el toro de lidia según Martín Roldán [Martín Roldán, 1965].

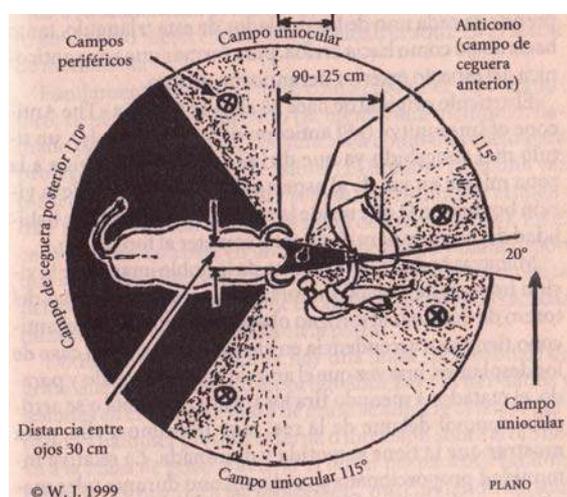


Figura 2.3. Campos visuales en el toro de lidia según Walter Johnston [Johnston, 2000].

Sin embargo, la posición lateral de los ojos en los bovinos hace que exista una zona de ceguera en la parte frontal del animal (Figura 2.4). Tal es así que muchos de los datos encontrados sobre el ganado de lidia se centran fundamentalmente en las dimensiones de esta zona que aparece en la literatura con diferentes nomenclaturas: cono de seguridad, anticono de inmunidad o cono de ceguera. A lo largo de este trabajo se usará un término más apropiado desde el punto de vista óptico: “zona de exclusión visual”.

En cuanto a las dimensiones de dicha zona en el toro de lidia, la primera alusión conocida corresponde al Dr. Anás que, basándose en la única experiencia de observar numerosas corridas de toros, afirmó que lo más cerca que el toro de lidia puede ver es a 3 m [Anasagasti, 1922]. Sanz Egaña situó este punto mucho más cerca, a 13-15 cm [Sanz Egaña, 1958]. Aunque Paños Martí estima que no puede ser mayor de 20 cm [Paños Martí, 1965], varios autores lo han situado en torno a 1 m [Martín Roldán, 1965; Daulouede, 1995; Johnston, 2000].

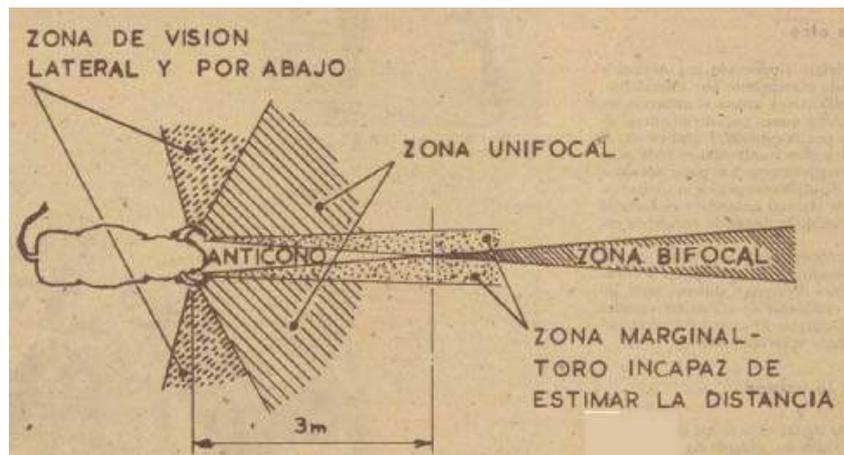


Figura 2.4. Representación esquemática del anticorno de inmunidad [Johnston, 1962].

A pesar de que el ganado de lidia pasa mucho más tiempo en la dehesa que en el ruedo, parece claro que las dimensiones de la zona de exclusión visual y las del campo visual (ambas, monocular y binocular) solamente van a determinar el comportamiento del animal a la hora de enfrentarse a lidia. En este sentido, el objetivo del presente capítulo ha sido calcular el campo visual en el toro de lidia y los parámetros asociados en función de la edad del animal. Los resultados no sólo nos permitirán añadir información a la caracterización del sistema visual del toro bravo, sino que ayudarán a dar respuesta a cuestiones fuera del ámbito de este trabajo y más relacionadas con el campo de la tauromaquia. Entre ellas estarían las razones para una correcta colocación del torero y la zona donde mostrar los engaños durante la lidia, aspectos que aún siendo clave en el arte del toreo, han acarreado sus dudas posiblemente desde los propios orígenes de la tauromaquia.

2.2. Métodos

2.2.1. Muestras

Se midió el campo visual en el plano horizontal en dos grupos de bovinos de lidia. El grupo #A estaba formado por 82 animales vivos (36 machos y 46 hembras) con edades entre 9 y 20 meses. Acorde con el argot taurino, 30 animales fueron becerros y 52 añojos, es decir menores de 1 y 2 años respectivamente.

Las medidas del campo visual se realizaron a partir de fotografías, como se indica a continuación en el apartado 2.2.2. Para esta operación se aprovechó el momento del herradero durante el cual los animales permanecieron inmovilizados en el cajón de curas, lo que facilitó la toma de fotografías (Figura 2.5). Todos estos animales pertenecían a la ganadería de Nazario Ibáñez, de encaste Núñez, ubicada en el término municipal de Yecla (Murcia).



Figura 2.5. Fotografía cenital de la cabeza del animal tomada en vivo durante el herradero. Se utilizó una regla de 20 cm como referencia de escala.

El grupo #B estuvo compuesto por 74 animales en condiciones *post-mortem*. Los pesos se situaron entre 165 y 561 kg, y las edades entre 18 y 63 meses. La distribución por edades fue: 5 añojos, 11 erales, 9 utreros, 46 cuatreños y 3 cinqueños. Los erales y utreros son animales menores de 3 y 4 años respectivamente. Los cuatreños son los toros de lidia con más de 4 años y menos de 5. Los cinqueños son animales con 5 años ya cumplidos. A efectos de representación de datos los cinqueños se incorporaron al grupo de cuatreños. Los toros procedían de 18 ganaderías diferentes, todas pertenecientes a la Unión de Criadores de Toro de Lidia y donde el 95% pertenecían al mismo encaste (Domecq). A petición expresa de los ganaderos, sus nombres quedan en el anonimato. Las condiciones de medida fueron idénticas a las del grupo #A (Figura 2.6).



Figura 2.6. Fotografías cenitales de la cabeza del animal en condiciones *post-mortem*. Se puede observar el pie de rey utilizado como referencia de escala y las marcas de las órbitas oculares.

Las fotografías se tomaron en los desolladeros de la Plaza de Toros de Murcia, Alicante y Abarán (Murcia), tras el arrastre posterior a la lidia y una vez la cabeza había sido separada

del resto del cuerpo. El protocolo fue aprobado por la empresa de la plaza (Toros Sureste, S.L.).

La razón por la que se hicieron estos 2 grupos de animales es la dificultad para medir animales de lidia en vivo. Normalmente y salvo en contadas ocasiones (enfundado, saneamiento, curas extraordinarias,...) los animales de lidia no suelen pasar por el muelco o cajón de curas donde se les bloquea el movimiento de la cabeza, que es la única situación en la que se podrían tomar fotografías en condiciones óptimas. Es por ello que se ha optado por este doble experimento. Los datos se analizaron por separado, aunque finalmente se agruparon todos para hacer un análisis de los posibles cambios en el campo visual con la edad.

Como comprobación de que tanto en vivo como en condiciones *post-mortem* los resultados eran similares, se tomaron fotos en dos uteros en el momento del desenfundado en la finca y tras su lidia (Plaza de Toros de las Ventas, Madrid). Las diferencias en los parámetros calculados no superaron el 3%, lo que indica la bondad del método para ambas condiciones experimentales.

La legislación de la Comunidad Europea autoriza el sacrificio de animales bovinos de lidia en espectáculos taurinos exclusivamente en España y Francia (Tratado de Lisboa, art. 13: [...] *while respecting the legislative or administrative provisions and customs of Member States relating in particular to religious events, cultural traditions and regional heritage*). El manejo de animales de lidia tanto en vivo como en condiciones *post-mortem* está regido por el Reglamento Taurino y/o la legislación regional que corresponda.

2.2.2. Cálculo del campo visual horizontal

Para cada animal objeto de este estudio se calculó geoméricamente el campo visual en el plano horizontal. Para ello se registraron tres fotografías de cada cabeza, una cenital o vista superior (Figuras 2.5 y 2.6) y dos laterales. Para el registro de la fotografía cenital siempre se intentó que la posición relativa entre la cabeza del animal y la cámara fotográfica fuese la indicada en la Figura 2.7, por ser ésta la posición natural de mirada del animal. Varias marcas directamente realizadas sobre la piel del animal indican la orientación del plano que contiene la órbita ocular y permiten relacionar espacialmente el trío de fotografías para asegurar la coherencia de las medidas y confirmar la simetría especular derecha-izquierda.

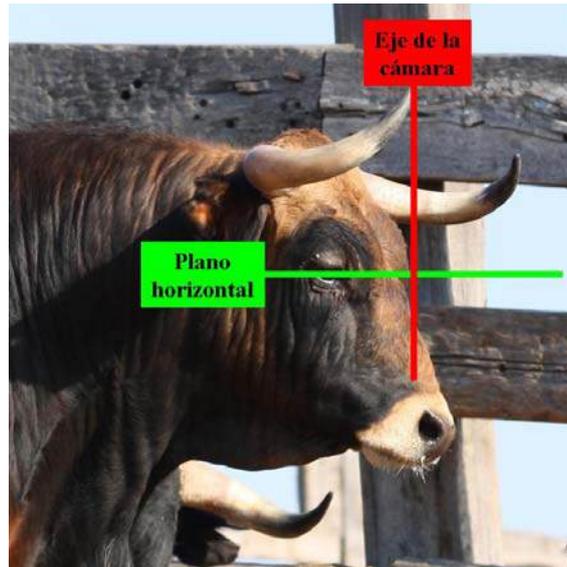


Figura 2.7. Posición relativa entre la cabeza del animal y la cámara fotográfica.

En todas las fotografías se ha incluido una escala (pie de rey o regla graduada) para establecer la correlación entre el tamaño real y el de los píxeles de la imagen. A la hora del registro se prestó especial atención a la eliminación de cualquier perspectiva que dificultara el posterior procesado de la imagen.

Las fotografías registradas, tanto en vivo como en condiciones *post-mortem*, se procesaron con el *software* comercial de retoque fotográfico Adobe Photoshop, donde la equivalencia entre los píxeles y las dimensiones reales nos permiten obtener directamente la información de ángulos y longitudes sobre la fotografía. La Figura 2.8 muestra la fotografía cenital y un esquema proyectado sobre la cabeza del animal para obtener los parámetros necesarios. En particular, tres parámetros claves servirán de base para obtener la información que se busca:

- Distancia CC'*: distancia interpupilar.
- Ángulo β* : ángulo que forman los ejes visuales de ambos ojos.
- Distancia O'D*: longitud de la zona de exclusión visual.

En una operación previa y cuando ha sido necesario, se ha girado la imagen de modo que la línea *CC'* que une los dos centro pupilares quede en posición vertical (Figura 2.8(b)). A partir de esta línea, de la inclinación de las órbitas y de la equivalencia pixel-mm se puede medir la distancia *CC'* y con ella calcular β . A partir de estos dos parámetros y con simples consideraciones trigonométricas, la distancia *O'D* se calcula mediante la ecuación:

$$O'D = \frac{CC'}{2} \cdot \cot\left(\frac{\pi - \beta}{2}\right) \quad (2.1)$$

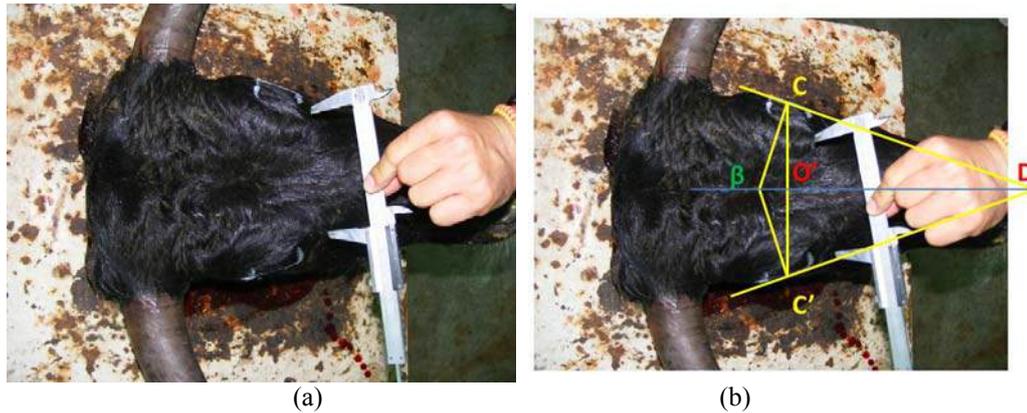


Figura 2.8. (a) Fotografía cenital de la cabeza del animal (a). El pie de rey (calibrador Vernier) marca un tamaño de 10 cm y se ha utilizado como referencia. (b) Esquema para determinación de los parámetros que sirven para el cálculo del campo visual.

En este punto hay dos aspectos a tener en cuenta. Por una parte, todo el método aquí expuesto está restringido al campo visual contenido en un plano horizontal, es decir en el plano situado a lo largo de las pupilas ovaladas del animal. Por otra, se está suponiendo que el campo visual monocular del animal es de 180° , lo cual no es correcto. Medidas anatómicas de la zona activa de la retina del bovino manso anteriormente publicadas [Heffner and Heffner, 1992] son coherentes con las realizadas en retina de toro de lidia utilizando microscopía multifotónica en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia [Bueno et al., 2010]. Ambas indican que el campo visual monocular en el toro de lidia es de unos 132° (a lo largo del denominado *horizontal visual streak*).

Con esta corrección el punto D de la Figura 2.8(b) se transformará en D' , situado más lejos de la cabeza del animal (se desplaza hacia adelante). Por tanto, la distancia $O'D'$ será la que marque la longitud de la zona de exclusión visual (Figura 2.9). El ángulo del vértice D' es el ángulo correspondiente a la zona de visión binocular del animal.

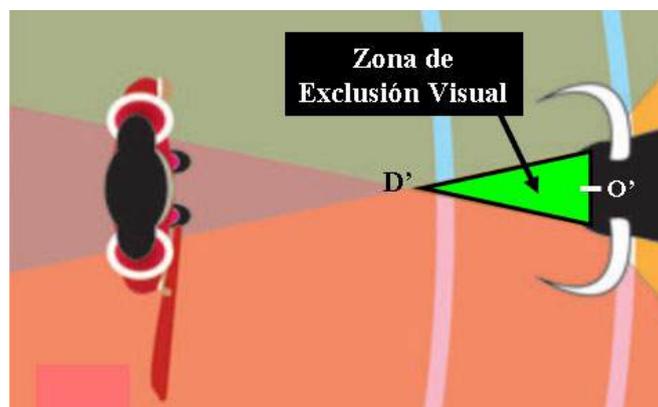


Figura 2.9. Definición de la zona de exclusión visual y el ángulo de visión binocular (modificación de una ilustración de J. Casals).

2.3. Resultados

2.3.1. Campo visual en ganado de lidia en vivo

En la Figura 2.10 se presenta la distancia interpupilar CC' en función de la edad para todos los animales del grupo #A.

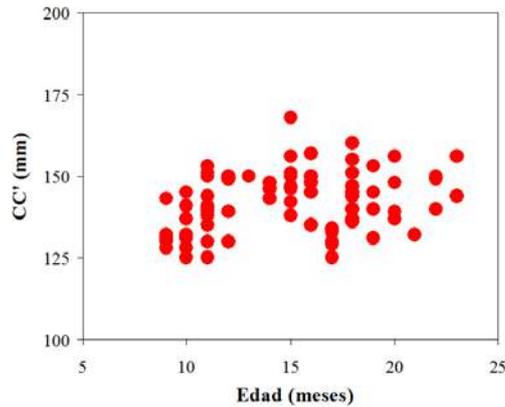


Figura 2.10. Valores de CC' en función de la edad para todos los animales del grupo #A.

Los valores oscilaron entre 125 y 168 mm, con valores medios de 139 ± 9 mm para los becerros y 144 ± 9 mm para los añojos (media global: 142 ± 9 mm). Aunque hay un crecimiento en la anatomía del propio animal con la edad, el parámetro CC' no muestra cambios significativos ($p=0.05$, $R=0.26$). Esto es debido posiblemente a que el intervalo de edades de esta muestra es reducido (solamente 14 meses, 9 meses el más joven y 23 el más viejo).

La Figura 2.11 muestra los valores del ángulo β para los mismos animales que en la figura anterior. La gráfica tampoco muestra variaciones significativas. El valor medio fue $133 \pm 2^\circ$ ($133 \pm 2^\circ$ y $132 \pm 2^\circ$ para becerros y añojos respectivamente).

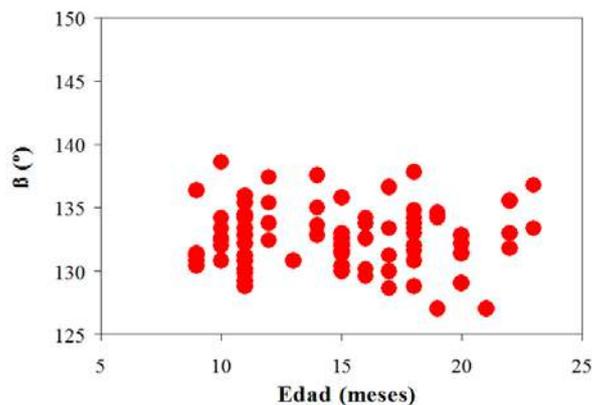


Figura 2.11. Ángulo β para todos los animales del grupo #A.

Las dimensiones de la zona de exclusión visual (distancia O'D', es decir, la longitud del cono frontal donde el animal no ve) se han representado en la Figura 2.12. Los valores presentan cierta variabilidad entre individuos (entre un mínimo de 168 mm y un máximo de

255 mm). El valor medio de O'D' en este grupo #A fue de 211 ± 19 mm (211 ± 18 mm para becerros y 212 ± 19 mm para añejos).

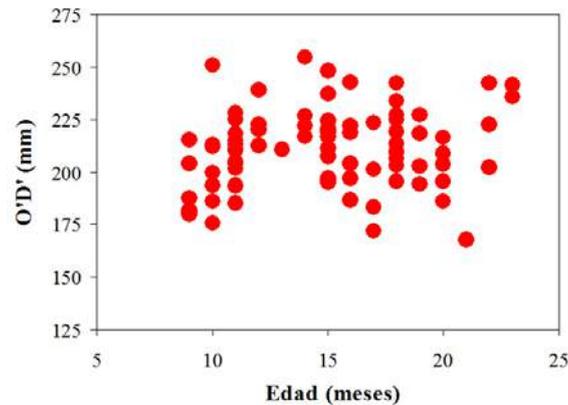


Figura 2.12. Dimensiones de la zona de exclusión visual para los animales del grupo #A.

Los resultados relativos al campo visual binocular (ángulo D') se muestran en la Figura 2.13. Como podría esperarse teniendo en cuenta los datos ya mostrados en la figuras anteriores, los valores de D' se distribuyen de forma relativamente homogénea a lo largo de los 14 meses del intervalo de edad de este grupo de animales. En particular, los valores estuvieron entre 31° y 43° , con una media de $37^\circ \pm 2^\circ$ ($37 \pm 2^\circ$ para becerros y $38 \pm 2^\circ$ para añejos).

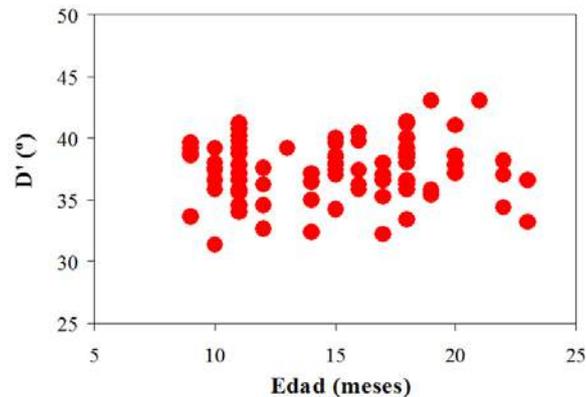


Figura 2.13. Ángulo de visión binocular en función de la edad del animal (grupo #A).

2.3.2. Campo visual en ganado de lidia post-mortem

La Figura 2.14 muestra los valores de la distancia interpupilar CC' en función de la edad para todos los animales del grupo #B. Los valores estuvieron en el rango que se extiende entre un mínimo de 153 mm y un máximo de 239 mm. Los datos muestran una correlación lineal significativa con la edad ($R=0.76$, $p<0.0001$).

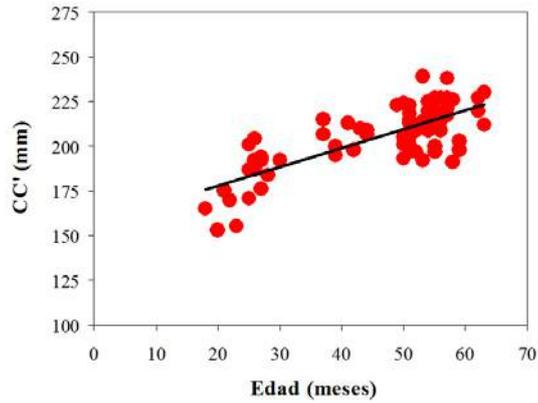


Figura 2.14. Relación entre la distancia interpupilar CC' y la edad para todos los animales del grupo #B. La línea negra representa el mejor ajuste lineal ($CC'=1.1*Edad+156.1$).

Para una mejor interpretación, la Figura 2.15 agrupa los animales por edades utilizando el argot taurino. En esta gráfica se puede apreciar claramente la variación, que es esperable debido al crecimiento del cráneo del propio animal con la edad (y del aumento de peso en general, véase la Figura 2.16).

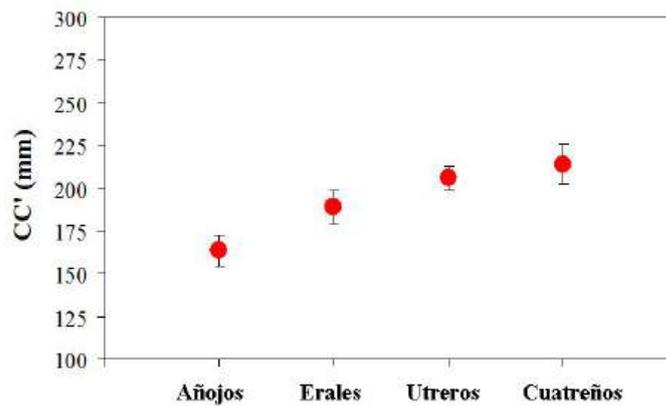


Figura 2.15. Valores medios de la distancia CC' en el ganado de lidia para distintos grupos de edad. Las barras de error indican la desviación estándar.

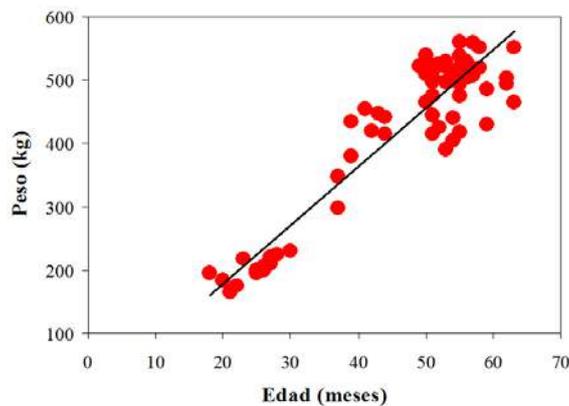


Figura 2.16. Correlación lineal significativa ($R=0.93$, $p<0.0001$) entre el peso del animal y la edad. La línea de mejor ajuste corresponde a $Peso=9.3*Edad-6.4$.

A pesar de que la distancia CC' cambia significativamente con la edad (y con el peso, $R=0.75$, $p<0.0001$), los valores del ángulo β se mantiene moderadamente estables, como muestra la Figura 2.17.

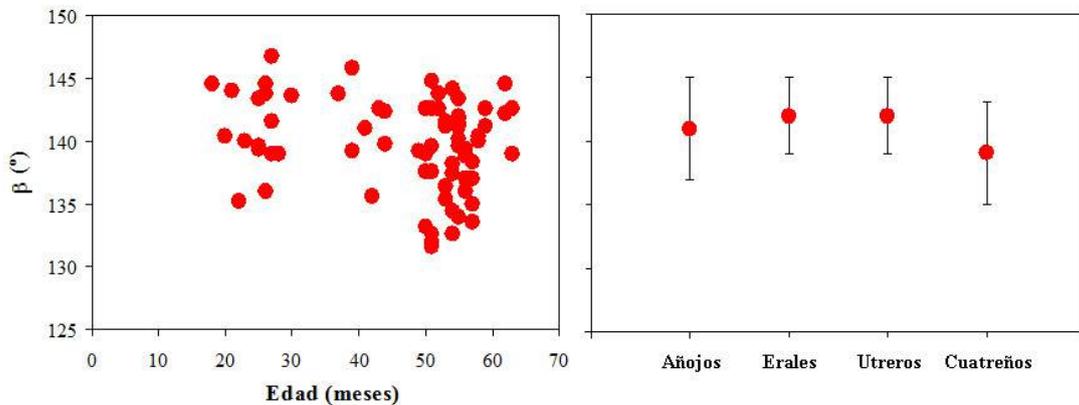


Figura 2.17. Ángulo β para los todos animales del grupo #B (izquierda) y agrupados por edades según el argot taurino (derecha). Las barras de error indican la desviación estándar.

A pesar de las diferencias inter-individuales (valores entre 132° y 147°), la gráfica no muestra una relación significativa entre ambos parámetros (student t-test), lo que indica que la divergencia de los ejes visuales no cambia con la edad. En concreto, para la muestra aquí estudiada, los valores estuvieron entre 132° y 147° , con una media de $139\pm 4^\circ$.

Los valores de la distancia O'D' para este grupo #B también muestran un aumento lineal con la edad de los animales, aunque no tan significativo como en el caso de CC' ($R=0.26$, $p=0.02$). La línea que mejor se ajusta a los datos responde a la ecuación: $O'D'=1.05*Edad+336.08$. Para una mejor representación de este cambio, la Figura 2.18 presenta el parámetro O'D' para los cuatro grupos de edad. Se puede observar cómo cuanto más edad tiene el animal, mayor es la zona de exclusión visual. Para la muestra analizada la variabilidad es mayor en utreros y cuatreños. En media hay un aumento de $\sim 40\%$ entre toros cuatreños (39 cm) y añojos (28 cm).

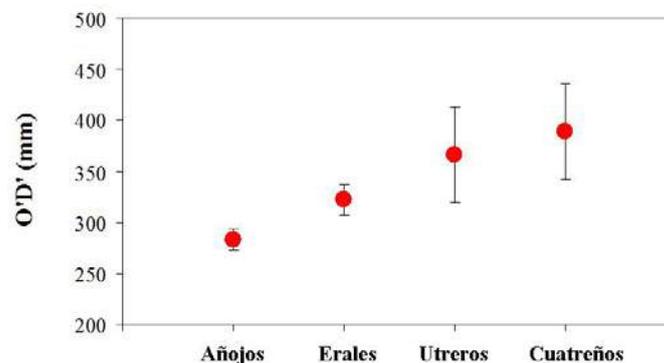


Figura 2.18. Longitud de la zona de exclusión visual O'D' para los animales del grupo #B.

Sin embargo, si nos fijamos en los valores del ángulo D' , ligados a la amplitud del campo visual binocular (Figura 2.19), se puede apreciar que quedan prácticamente constantes con los años. En particular, para este grupo de animales se obtuvo un valor medio de $30 \pm 4^\circ$.

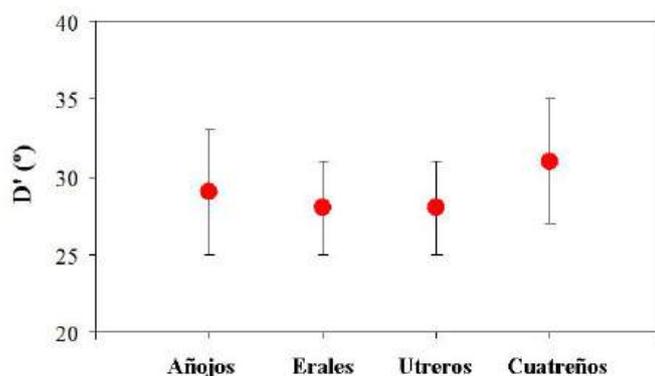


Figura 2.19. Ángulo de visión binocular en función de la edad del animal (grupo #B).

2.3.3. Campo visual en ganado de lidia y edad: un resumen

En este apartado se han combinado todos los resultados obtenidos en los dos apartados anteriores para una mejor comparación de los parámetros asociados al campo visual y su dependencia a la edad de los animales, independientemente de si fueron medidos en vivo o *post-mortem*.

La distancia interpupilar CC' para todos los animales de los grupos #A y #B agrupados por rangos de edad se presentan en Figura 2.20. Como se podría esperar por lo mostrado ya en la Figura 2.10, entre becerros y añojos vivos no hay diferencias. Sin embargo hay una diferencia significativa (student t-test, $p < 0.0001$) entre los añojos en vivo y los *post-mortem*. Esta diferencia significativa se ve de forma más clara en los valores del ángulo β de la misma Figura 2.21, donde los valores medios fueron respectivamente $132 \pm 2^\circ$ y $141 \pm 4^\circ$.

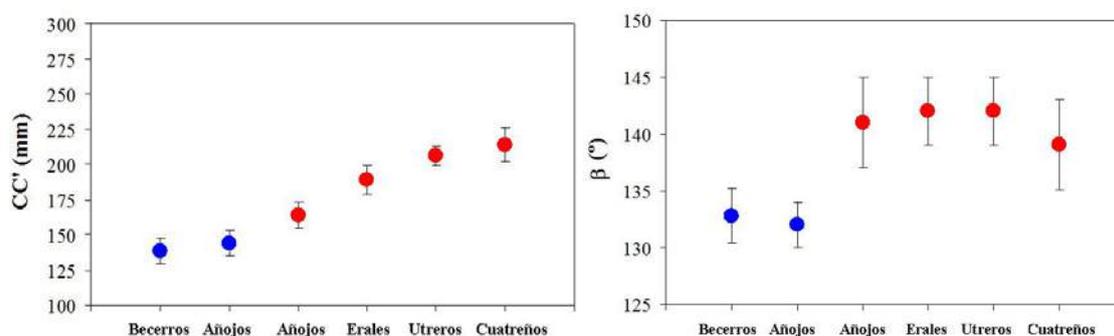


Figura 2.20. Valores medios de la distancia CC' (izquierda) y del ángulo β (derecha) para en todos los animales medidos agrupados por edades. Las barras de error indican la desviación estándar para cada grupo. Símbolos azules, grupo #A; símbolos rojos, grupo #B.

De igual forma estas diferencias se reflejan tanto en la longitud de la zona de exclusión visual como las dimensiones del campo visual binocular (Figura 2.21).

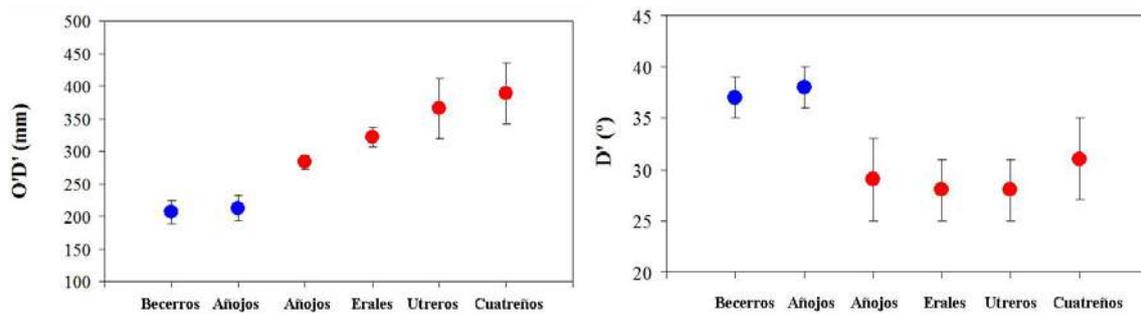


Figura 2.21. Valores medios de longitud de la zona de exclusión visual O'D' (izquierda) y el ángulo de visión binocular D' (derecha) en todos los animales medido agrupados por edades. Las barras de error indican la desviación estándar de cada grupo. Símbolos azules, grupo #A; símbolos rojos, grupo #B.

2.4. Discusión

El estudio desarrollado en este Capítulo 2 presenta un análisis cuantitativo del campo visual horizontal del toro de lidia a partir de fotografías calibradas de las cabezas de los animales y una serie de relaciones trigonométricas. Aunque el método utilizado ha sido el mismo para todos los animales, los resultados se han dividido en un grupo en vivo y otro *post-mortem*. Sin embargo finalmente en el apartado 2.3 se han mostrado todos los valores medidos juntos con el objeto de analizar los posibles cambios con la edad.

Como ya se comentó en el Capítulo 1, una disposición frontal de los ojos proporciona una amplia binocularidad. La consecuencia de recibir información visual de ambos ojos de forma simultánea es incrementar la visión de detalles (o la AV) y proporcionar información sobre la distancia a la que están situados los objetos [Jones and Lee, 1981]. Esta visión frontal también indica que la atención visual se centrará en los estímulos colocados justamente delante.

Por el contrario, el sistema visual de los bovinos en general, y el toro de lidia en particular, presenta adaptaciones a las condiciones ambientales donde desarrolla su actividad, acentuándose los aspectos importantes ligados a la supervivencia por ser éstos no depredadores. Así, la disposición lateral con la visión panorámica correspondiente sirve para maximizar la fijación visual en objetos excéntricos (que podrían virtualmente ser de amenaza) y los movimientos periféricos. La combinación del área activa de la retina, la forma alargada de la pupila y la posición de las órbitas le proporciona al bovino una amplia visión monocular, aunque notablemente más extensa en la dirección horizontal que en la vertical. En posición natural de mirada (Figura 2.7) el bovino es capaz de “escanear” el horizonte en base a sus dos campos monoculares. Experimentos con ganado bovino manso han mostrado una respuesta preferencial del ojo izquierdo a estímulos inmediatos [Robins and Phillips, 2010]. La visión del ojo derecho estaría especializada en las decisiones relativas a señales abstractas o detalles alejados [Vollartigara and Rogers, 2005; Robins and Phillips, 2010]. A la vez que funcionan

estos campos monoculares en las zonas laterales, el campo binocular le permite analizar la zona frontal, para ver en profundidad y determinar tanto las distancias a los objetos como la velocidad de movimiento de éstos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los animales *post-mortem* (véase debajo los comentarios correspondientes a las medidas en vivo), el campo binocular del toro de lidia es de unos 30° y se ha mostrado que prácticamente no cambia con la edad (Figura 2.19). Este ángulo está en el rango encontrado en la literatura para ganado bovino manso, que lo sitúan entre 25° y 50°, (véase como ejemplo [Phillips, 2002; Heesy, 2004]), aunque algunas fuentes establecen valores más concretos como 52° [Walls, 1942] o 78° [Guigui, 1989]. Sin embargo ninguna de las fuentes cita la forma en la que fue calculado.

En el caso del toro de lidia, los valores encontrados en la literatura rondan la cota inferior encontrada en el ganado bovino en general: 20° [Martín Roldán, 1965; Johnston, 2000]. Los resultados aportados en este capítulo muestran que la zona es mayor de lo que muestra la literatura existente, aunque debido a la ausencia de detalles en la forma del cálculo, no nos permite establecer las posibles causas de la diferencia encontrada. Este campo binocular tan reducido (comparado con los 150° de los humanos) indica que la estereopsis está posiblemente limitada a distancias cortas, aunque el animal puede utilizar otras pistas para estimar las distancias.

El campo visual binocular depende de diversos factores aunque se ha demostrado que en mamíferos hay una correlación lineal entre el campo binocular y la posición de las órbitas [Heesy, 2004]. Este hecho está apoyado con los valores obtenidos en este capítulo para el ángulo β (Figura 2.17), que tampoco cambian significativamente con la edad ($\sim 140^\circ$ en media en las medidas *post-mortem*). Esta estabilidad en el ángulo que forman los ejes visuales es coherente con un crecimiento uniforme y proporcionado de la cabeza del animal que hace que las distancias angulares se conserven.

Varias fuentes citan datos sobre la divergencia de las órbitas en el bovino, aunque nunca se indica ni la forma de medida ni la edad de los animales: 113° en la vaca [Walls, 1942] y 104° en el buey [Land and Nilsson, 2012]. Medidas más generales en bovinos, sin especificar la raza ni la edad, indican que las órbitas forman un ángulo entre 115° y 135° con una media de 119° [Daulouede, 1995]. En el caso particular del toro de lidia se ha encontrado un único dato: 135° [Martin Roldán, 1965].

Resulta evidente que este crecimiento natural del cráneo lleva asociado un aumento de la distancia interpupilar CC' con la edad (Figuras 2.14 y 2.15). En los resultados aquí obtenidos CC' pasa de un valor medio de 139 mm en los becerros a 214 mm en los toros cuatrefños. Se

han encontrado pocas alusiones a este parámetro en la literatura y ninguna de ellas aporta detalles más allá de un número: 180 mm en la vaca [Walls, 1942] y 350 mm en un bovino de tamaño medio [Duke-Elder, 1958].

En el análisis completo de todos los animales se observaron diferencias entre los resultados de los añajos medidos en ambas condiciones experimentales. Si bien estas diferencias son estadísticamente significativas, en la práctica son 2 cm en CC', 7 cm en O'D' y 9° en el ángulo D'. Dos podrían ser las posibles fuentes de estas discordancias. Por una parte, el número de añajos en el grupo #B es muy reducido (N=5) comparado con los del grupo #A (N=52). Por otra, hemos de tener en cuenta que ambos grupos de animales pertenecen a diferentes encastes. Mientras que el grupo #B es predominantemente Domecq, el grupo #A está únicamente formado por animales de encaste Núñez. No es objeto de este trabajo discutir las diferencias entre encastes del ganado bravo, pero sí que es interesante destacar que es posible que la morfología asociada y particular de cada encaste, lleve asociada pequeños cambios en los parámetros relativos al campo visual, como en el caso aquí mostrado.

Por otra parte se ha corroborado de nuevo la existencia de dos zonas ciegas, una delante que hemos denominado zona de exclusión visual y otra detrás. Teniendo en cuenta los datos aquí mostrados, un sencillo cálculo angular lleva a que la extensión de la zona ciega posterior es de unos 68° en media, lo que implica que el campo visual total (medio) del toro de lidia es de 292° y no depende de la edad del animal. El tamaño de la zona ciega posterior es más pequeño que los 110° reportados en el toro de lidia [Martín Roldán, 1965]. El tamaño del campo visual total aquí obtenido es menor que los 330° reportados en ganado manso [Dimberton, 1999; Phillips, 2002]. Sin embargo es similar a los 250° previamente reportados en el toro de lidia [Martín Roldán, 1965] y aproximadamente un 50% mayor que los 205° también encontrados en la literatura [Sanz Egaña, 1958].

Aunque está fuera del alcance de las medidas de esta Tesis Doctoral, hay que tener en cuenta que estos datos corresponden a condiciones estáticas, porque el campo visual estático podría verse modificado dependiendo de las condiciones de estrés del animal, fundamentalmente en las zonas laterales [Rehkämper and Görlach, 1997].

En la Figura 2.22 se puede apreciar de forma esquemática y a escala aproximada las dimensiones de la zona ciega posterior del toro de lidia cuando éste está colocado en la zona ocupada por las líneas de picadores.

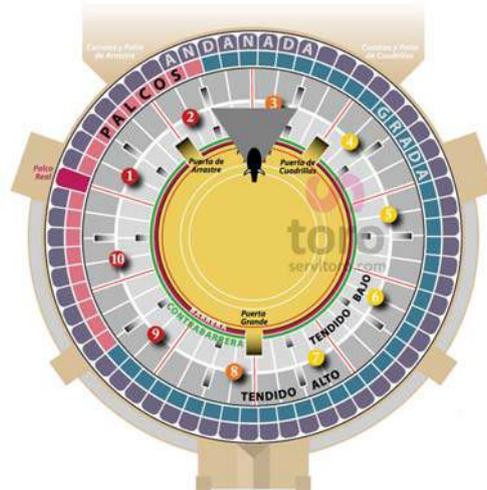


Figura 2.22. Dimensiones de la zona ciega posterior en el toro de lidia (figura modificada a partir de una imagen de <http://www.servitoro.com>).

Pero quizás el resultado más destacado de este Capítulo 2 es que por primera vez se ha constatado que la longitud de la zona de exclusión visual O'D' del toro de lidia aumenta con la edad (Figuras 2.18 y 2.21). Como ya se aludió en el apartado 2.1, a día de hoy no hay un acuerdo general sobre las dimensiones de esta zona, que va desde un máximo de 3 m hasta un mínimo de unos 15 cm. Un trabajo más reciente la fija en 15-20 cm [Ferret, 2005]. Nuestros resultados establecen que en media hay un aumento progresivo de un 40% entre los añojos (~280 mm) y los cuatreños (~390 mm), el cambio es casi de un 90% si se comparan becerros (~210 mm) y cuatreños. Estos valores están colocados en la zona inferior de lo reportado en la literatura y están muy lejos de los 95-105 cm citados por diversas fuentes a lo largo de décadas [Martín Roldán, 1965; Daulouede, 1995; Johnston, 2000].



Figura 2.23. Fotografía que de forma cualitativa sirve para indicar cómo el torero estaría siempre fuera de la zona de exclusión visual del toro.

Desde el punto de vista de la tauromaquia, los resultados aquí mostrados y discutidos ayudan sin lugar a dudas a responder a la sempiterna pregunta: En condiciones normales, ¿ve el toro de lidia al torero cuando está colocado justamente delante de él a la distancia habitual de toreo? Puesto que ahora se conoce de forma fehaciente que la longitud de la zona de exclusión visual en un toro cuatreño es de aproximadamente 40 cm, la respuesta es

contundente: Sí, siempre (véase como ejemplo cualitativo a Figura 2.23). Posiblemente las faenas “tremendistas” donde el torero se coloca relativamente cerca y delante del toro y éste no embiste, obedezcan más al sometimiento del animal en el desarrollo de la lucha que a causas relacionadas con los aspectos visuales.

Refracción ocular

Burriciegos.—Son aquellos toros defectuosos de la vista, de los cuales unos ven poco ó nada desde lejos otros que le sucede lo contrario, y algunos que de cerca ven bien. Cuando los diestros consiguen averiguar la índole de ésta clase de cornúpetas, se les vé *citar en corto* á los que *ven de cerca*, para que se fijen bien en el *bulto* y se consientan, *quebrándolos* en la cabeza, para evitar el *embroque*, si el toro *conserva piés*.

CAPÍTULO 3

Estado Refractivo Ocular del Toro de Lidia

3.1. Introducción

La longitud axial del globo ocular y la potencia de los elementos de óptica ocular (córnea y cristalino) determinan el ERO y el correcto funcionamiento del ojo como sistema óptico [Bennett and Rabbetts, 2004]. Un ERO alterado afecta inevitablemente al comportamiento del sujeto, por lo que su estudio resulta fundamental a la hora de establecer las causas de determinadas actitudes, y su corrección (normalmente con gafas o lentes de contacto) mejora su calidad de la vida.

Como ya se apuntó en el Capítulo 1, el sistema visual (y en particular la parte óptica) de los humanos no es directamente comparable al de los animales, aunque el estudio de estos últimos es esencial en el campo de la Óptica Fisiológica. Es de suponer que un mismo ERO no tiene porqué tener el mismo “efecto visual” en distintos animales. Esto es debido a que la ametropía es simplemente un error de foco en la parte óptica del proceso visual, y la parte retiniana (básicamente la densidad de células fotorreceptoras retinianas) y la neuronal tienen también sus funciones, fundamentalmente procesar e interpretar los datos aportados por la parte óptica. Además, puesto que las ametropías oculares no se suelen corregir en animales, estos errores refractivos pueden afectar a su vida cotidiana alterando su comportamiento frente a diferentes situaciones durante toda su existencia. Resulta por tanto interesante llevar a cabo estudios sobre el ERO de diferentes animales con el objetivo de averiguar las causas de las alteraciones en la refracción ocular, así como para comprender mejor los factores que limitan el rendimiento visual.

Las razones por las que el ERO en los animales pueden verse alterado son diversas. El primero de ellos es el factor genético [Feldkämper and Schaeffel, 2003]. Los errores refractivos también dependen de la raza, como se ha encontrado en ojos de perros, gatos y caballos [Kubai et al., 2008; Konrade et al., 2012; Rull-Cotrina et al., 2013]. Se ha mostrado que la edad también afecta al ERO en perros [Kubai et al., 2008], gatos [Konrade et al., 2012], gacelas [Ofri et al., 2004], conejillos de indias [Zhou et al., 2006] y ratones [Zhou et al., 2008]. Además, los ojos de los mamíferos jóvenes, aves y vertebrados inferiores pueden verse afectados por el entorno visual [Belkin et al., 1977; Shen and Sivak, 2007; Ashby and Schaeffel, 2010; Benavente-Pérez et al., 2012].

A pesar de que los ojos de bovinos se utilizan a menudo para fines académicos, no se han encontrado en la literatura estudios sobre el ERO de esta especie, aunque sí sobre su AV (véase apartado 1.3) y sobre preferencias laterales cuando tienen que visualizar nuevos estímulos [Robins and Phillips, 2010]. En este sentido, una raza particular como es el toro de lidia merece especial atención. Este tipo de animales, criados en régimen extensivo en terrenos de grandes dimensiones, tienen un contacto limitado con los humanos. Aunque se seleccionan genéticamente con el objeto de maximizar la combinación de energía física, acometividad y agresividad, su comportamiento por lo general difiere significativamente entre animales (incluso entre hermanos) durante la lidia [Pinniger, 1988]. A diferencia del toro de lidia, el ganado bovino manso se cría en granjas intensivas y su objetivo es la producción de leche o el consumo de su carne. Las instalaciones son de mucho menor tamaño y estos animales tienen una interacción diaria con sus criadores. Dado que las condiciones del entorno y los hábitos de vida difieren claramente entre ambas poblaciones bovinas, su rendimiento visual y en particular su ERO podría verse afectado.

El sentido de la vista en el toro de lidia es una de las claves esenciales durante los espectáculos taurinos. De ahí que cualquier defecto lo puede inutilizar para ese cometido. Durante la lidia hay veces que se observa que estos animales parecen no tener una visión correcta (cercana o lejana) [Anasagasti, 1922]. En esos casos el comportamiento del toro está fuera de lo normal, lo que podría ser muy peligroso para el matador. A pesar de que durante muchos años veterinarios, ganaderos, toreros y aficionados se han interesado por este tema, en la bibliografía solamente se encuentran afirmaciones vagas e imprecisas sobre los defectos en la vista. Éstas hacen referencia, tanto a (1) una miopía congénita en el toro de lidia [Sanz Egaña, 1958; Paños Martí, 1965], como a (2) la hipermetropía debida a la constitución anatómica de las estructuras oculares con un diámetro antero posterior corto [Martín Roldán, 1965], así como a (3) toros defectuosos de la vista o burriciegos [Cossío, 1974].

En la mayor parte de la literatura consultada, el toro burriciego es referido, de forma reiterada y frecuente, como aquel animal con defecto en la vista que le hace arrancar y desarrollar la suerte de forma diferente a los demás. Se suelen clasificar en [Cossío, 1974; Selarom, 2009]:

a) *Los que ven mucho de cerca y poco o nada de lejos.* Se trata de toros que hay que citarlos siempre sobre corto. Arrancan con gran codicia a los objetos que no saben por dónde han venido. Toreados con conocimiento son los mejores de los burriciegos, ya que tienen la ventaja de no seguir el bulto porque como no ven bien de lejos les parece grande la distancia y no hacen por él.

b) *Los que ven poco de cerca y mucho de lejos.* Son los más peligrosos, porque parten fijos en el objeto y al llegar a jurisdicción no obedecen u obedecen mal al engaño, pues ya de cerca vislumbran sólo la totalidad del bulto.

c) *Los que ven mal de cerca y de lejos.* Son toros que “si no fuera porque son muy pesados en todas las suertes y se aploman con facilidad, serían los mejores de los burriciegos”.

d) *Los que ven bien de un ojo y mal de otro.* Son muy pesados en todas las suertes y se aploman con facilidad.

El conocimiento del ERO del toro de lidia proporcionaría información sobre la óptica ocular como el primer paso del proceso visual y podría potencialmente ayudar a explicar el, a veces, inusual (o cambiante) comportamiento de algunos animales en el ruedo de la plaza de toros cuando el estímulo (capote o muleta) se muestra a distancias cercanas (o lejanas). Desde el punto de vista menos científico y más taurino, esto también permitiría valorar si los errores refractivos son determinantes en la existencia de toros burriciegos y si el término que lo define es preciso.

En este contexto el objetivo del presente capítulo es analizar el ERO de una población de toros de lidia y compararlos con los valores obtenidos en un conjunto de animales bovinos mansos. También se discute la potencial relación entre los errores refractivos y el comportamiento del toro en el ruedo. Debido al acceso restringido a las explotaciones de ganado de lidia, a las condiciones especiales de seguridad y a los permisos particulares, las medidas in vivo son difíciles de llevar a cabo.

Para comparar condiciones experimentales similares se han realizado medidas del ERO en condiciones *post-mortem* en ganado de lidia y manso (inmediatamente después de la lidia o tras el sacrificio en el matadero). Sin embargo los resultados también incluyen medidas in vivo realizadas en becerros en el momento de ser herrados y en un grupo pequeño de toros en el momento del enfundado.

3.2. Métodos

3.2.1. Medida de la refracción ocular en bovinos

Para cada animal objeto de este estudio (véase Tabla 3.1) se midió el ERO de ambos ojos utilizando un retinoscopio de mano (HEINE Optotechnik, Herrsching, Alemania) [Yinon et al., 1980]. Los detalles sobre cómo se realiza la retinoscopia se pueden consultar en el apartado 1.4. En los toros de lidia dos personas diferentes se encargaron de las medidas. Previamente se habían comparado los resultados en 10 animales (20 ojos) entre las medidas hechas por ambas personas y las diferencias estuvieron dentro del error experimental. En el caso del ganado manso una única persona llevó a cabo las medidas. Para todos los ojos la medida del ERO se realizó a lo largo en el MH (ver recuadro insertado en la Figura 3.1(a)). Además, para el grupo #5 (Tabla 3.1) también se midió el MV con el objeto de comprobar la presencia de astigmatismo. Los ojos se examinaron con lentes de prueba (precisión de 0.25 D) a una distancia de trabajo de 67 cm por lo que a los resultados de refracción bruta hay que sumarles -1.50 D para obtener la refracción neta. El orden de los ojos para realizar la medida fue aleatorio. Como ejemplo, la Figura 3.1 muestra una fotografía tomada durante las medidas.

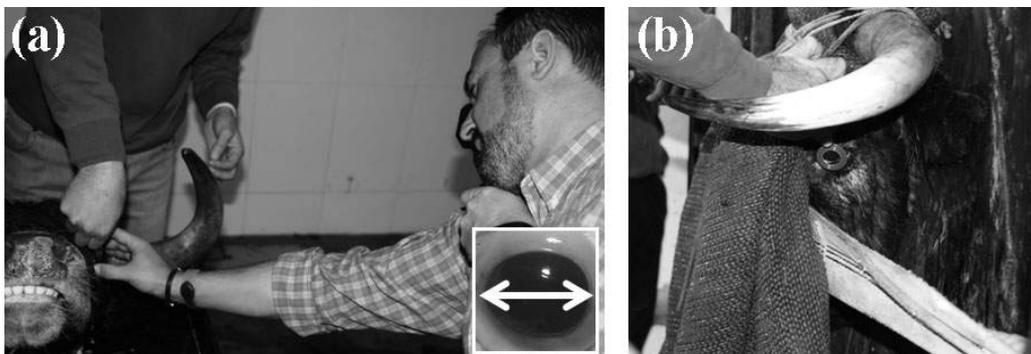


Figura 3.1. Retinoscopia realizada en ganado de lidia en condiciones *post-mortem* (a) y en vivo (b).

3.2.2. Muestras

El ERO se midió en varios grupos de animales bovinos. El grupo #1 estaba formado por 100 ojos de 50 toros de lidia en condiciones *post-mortem*. Las medidas se realizaron en el desolladero de la Plaza de Toros de Murcia, en cuyos corrales los animales permanecieron 3 días antes de la correspondiente lidia. Los toros procedían de 16 ganaderías diferentes distribuidas por toda la Península Ibérica y pertenecientes a la Unión de criadores de Toros de Lidia. Las edades se situaron entre 48 y 70 meses (cuatreños y cinqueños, edad media: 54 ± 4 meses). Los pesos oscilaron entre 480 y 572 kg.

Los ojos se midieron en el desolladero de dicha plaza en las mismas condiciones descritas en el Capítulo 2. Tras el arrastre y una vez la cabeza había sido separada del resto del cuerpo. Análisis preliminares no mostraron diferencias entre los valores de refracción antes y después de separar la cabeza. Se optó por esta condición para minimizar las interferencias con las actividades tanto de los carniceros, como de los veterinarios de servicio. Los protocolos de medida fueron aprobados por el empresario de la plaza (Toros Sureste, S.L.) y por la Consejería de Sanidad de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Debido a las condiciones *post-mortem*, la pupila del ojo estuvo siempre dilatada (midriasis). El tiempo entre la muerte y la medida nunca excedió de 15 min. Los ojos no se manipularon ni antes ni durante el examen. Tras la muerte del animal se producen cambios en la presión intraocular que podrían potencialmente afectar tanto a la morfología del ojo como a la medida del ERO [Balci et al., 2010]. En el presente experimento no se encontraron cambios en la presión intraocular cuando ésta se midió con un tonómetro en 10 animales a los 10, 20 y 30 minutos de su muerte. Por otra parte, las condiciones *post-mortem* también producen cambios en la reflectividad retiniana que podrían afectar a las medidas con el retinoscopio. Para evaluar este aspecto se midió la refracción en los ojos de 10 animales en los mismos intervalos de tiempo sin obtenerse cambios.

El grupo #2 lo formaron 18 ojos de 9 toros de lidia más jóvenes, con edades entre 38 y 46 meses (utreros). El ERO se midió en las mismas condiciones que en el grupo #1.

El grupo #3 lo componían 7 animales lidia de una única ganadería y el experimento se realizó en condiciones en vivo. Los toros pertenecían a la ganadería de Nazario Ibáñez (Yecla, Murcia) y las edades oscilaron entre 41 y 45 meses. Para estas medias se aprovechó la operación de enfundado durante la cual los animales estaban inmovilizados en el muelco (Figura 3.1(b)) y también se utilizó el retinoscopio. Antes de entrar en el muelco los animales fueron tranquilizados con una inyección intramuscular de Xilacina (10 mg/100 kg) debido a la cual las pupilas estaban en fase de midriasis [Hsu et al, 1981]. Puesto que el mecanismo de la acomodación es mínimo en el ganado bovino [Prince et al., 1960; Baldwin, 1981] la influencia de éste en las medidas se supone despreciable. Estas medidas en vivo no interfirieron en ningún momento con la actividad del veterinario.

El grupo #4 lo formaron 98 ojos de 49 animales (23 machos, 27 hembras) con edades entre 9 y 20 meses. Las medidas del ERO se realizaron a lo largo del MH y en vivo en 15 becerros y 34 añojos. Para esta operación se aprovechó el momento del herradero durante el cual los animales permanecieron inmovilizados en el cajón de curas, lo que facilitó la medida

del ERO (Figura 3.2). Todos estos animales también pertenecían a ganadería de Nazario Ibáñez.



Figura 3.2. Becerro en el cajón de curas en el momento de realizarse el herrado y la retinoscopia.

El grupo #5 estuvo compuesto por 70 ojos de 35 toros de lidia con una edad media de 45 ± 15 meses y pesos entre 412 y 568 kg. En este conjunto de ojos la refracción se midió a lo largo de los MH y MV con el objeto de medir la presencia de astigmatismo. Las condiciones de medida fueron las mismas que en el grupo #1.

Finalmente el grupo #6 se usó para comparar dos razas de ganado bovino. Estuvo formado por 100 ojos de 50 animales bovinos de raza Limusina (ganado manso, 21 machos y 29 hembras). Las medidas del ERO a lo largo del MH se realizaron en condiciones *post-mortem* en un matadero local. La media de edad de este grupo fue 13 ± 4 meses (rango [7, 28]). El peso estuvo entre 285 y 680 kg. En ningún momento el experimento interfirió con las actividades de los operarios o veterinarios del matadero. Todas las medidas se realizaron como máximo a los 10 minutos de la muerte del animal.

La Tabla 3.1 resume los diferentes grupos de animales utilizados en el presente estudio.

<i>Grupo</i>	<i>Tipo de ganado</i>	<i>Edad</i>	<i>Condiciones</i>	<i>Número ojos</i>
#1	Lidia	54 ± 4	<i>Post-mortem</i>	100
#2	Lidia	45 ± 4	<i>Post-mortem</i>	18
#3	Lidia	43 ± 2	En vivo	14
#4	Lidia	13 ± 3	En vivo	98
#5	Lidia	45 ± 15	<i>Post-mortem</i>	70
#6	Manso	13 ± 4	<i>Post-mortem</i>	100

Tabla 2.1. Características y distribución de los grupos de animales analizados en este capítulo.

Antes de las corridas todos los animales bravos fueron examinados en los corrales de la plaza de toros por veterinarios especializados. Esta operación determina si el animal es apto o

no para su lidia. En el presente trabajo solamente influiría la parte oftalmológica, en la que se desecharían animales con cataratas, edema corneal, hinchazón de los párpados o lagrimeo excesivo, entre otros.

Las condiciones de sacrificio de las reses en el matadero también fueron acordes a la legislación comunitaria europea. Al igual que los animales de lidia, éstos también pasaron su reconocimiento *ante-mortem* obligatorio en cualquier establecimiento de este tipo. Se desecharon todos aquellos que el examen oftalmológico *post-mortem* presentaron alguna anomalía ocular que pudiera interferir con la medida del ERO.

3.3. Resultados

3.3.1. Refracción ocular en ganado de lidia *post-mortem*

La Figura 3.3 muestra los valores del ERO (refracción esférica neta) para todos los ojos del grupo #1 medidos a lo largo del MH. Se puede observar que hay cierta variabilidad interindividual. Los valores oscilaron entre -1.00 y +2.5 D, con una media de $+0.66 \pm 0.85$ D. 15 ojos (15%) fueron miopes (refracción ≤ -0.50 D). Los valores medios fueron $+0.74 \pm 0.85$ D y $+0.59 \pm 0.84$ D en ojos derechos (OD, símbolos rojos) y ojos izquierdos (OS, símbolos azules). Estos valores muestran por tanto una tendencia a la hipermetropía.

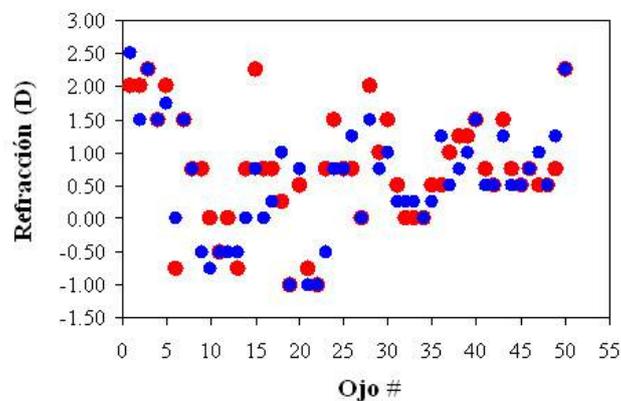


Figura 3.3. Valores del ERO para los 100 ojos del grupo #1. Los símbolos rojos y azules corresponden a OD y OS respectivamente.

La Figura 3.4 presenta los mismos valores de refracción en función de la edad de los animales del grupo #1. El tratamiento estadístico (t-test) no reveló ninguna relación significativa entre ambos parámetros ($p=0.35$). El ERO tampoco presentó ninguna relación con el peso de los animales ($p=0.06$). Tampoco se encontraron diferencias significativas entre los ERO de animales procedentes de diferentes explotaciones ganaderas.

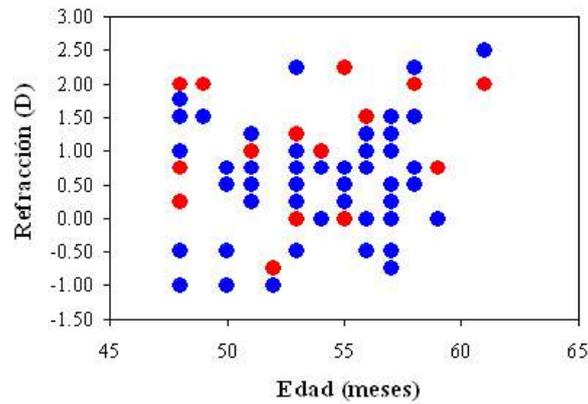


Figura 3.4. Valores de refracción ocular en función de la edad de los animales en el grupo #1. Los símbolos representan lo mismo que en la Figura 3.3.

Para analizar la posible simetría entre el OD y el OS, la Figura 3.5 compara los valores de refracción entre ambos ojos. Los datos muestran una correlación lineal significativa ($R=0.83$, $p<0.0001$).

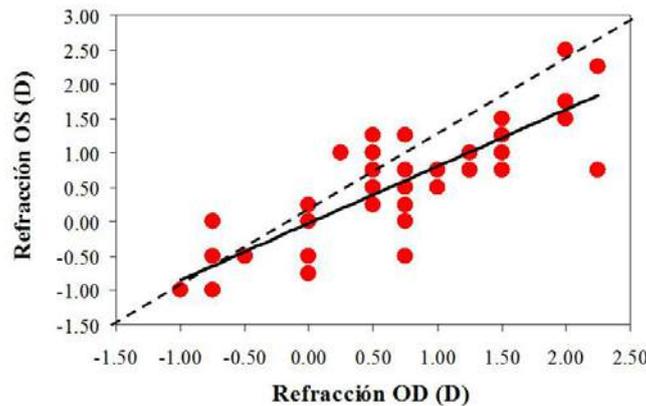


Figura 3.5. Comparación de los errores refractivos esféricos entre el OD y el OS en los 50 animales del grupo #1. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($R_{OS}=0.83*R_{OD}-0.02$). La línea discontinua es la 1:1.

La distribución de los errores de refracción en todos los ojos se presenta en la Figura 3.6. Casi el 70% de los ojos presentó errores de refracción mayores de +0.25 D.

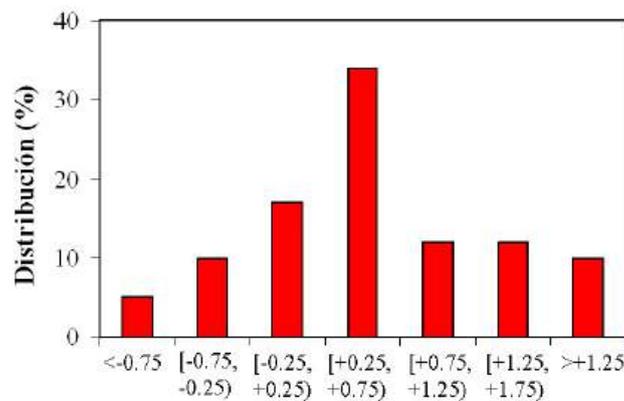


Figura 3.6. Distribución de los valores del ERO en todos los ojos del grupo#1.

La Figura 3.7 presenta la distribución de anisometropía, es decir, la diferencia de refracción (en valor absoluto) entre cada par de ojos del mismo animal. Los valores oscilaron entre 0 y 1.5 D, con una media de 0.36 ± 0.36 D.

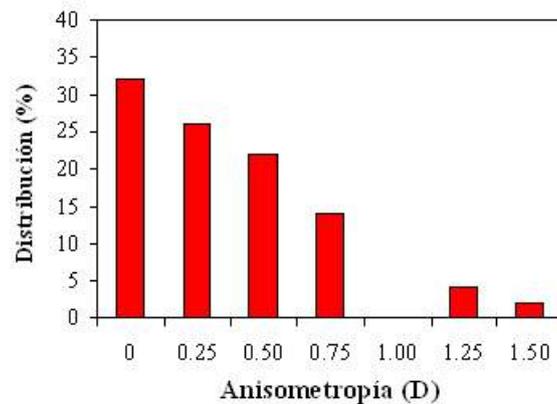


Figura 3.7. Distribución de anisotropía en los ojos del grupo #1.

Para profundizar un poco más en el posible efecto de la edad, la Figura 3.8 compara los valores medios de ERO del grupo #1 con los del grupo #2 que involucra ojos (N=18) de uteros. En este grupo los valores del ERO se situaron entre -1.50 y +1.25 D. A pesar de la diferencia de edad (y el número reducido de ojos de este grupo), no se han encontrado diferencias significativas entre ambas poblaciones.

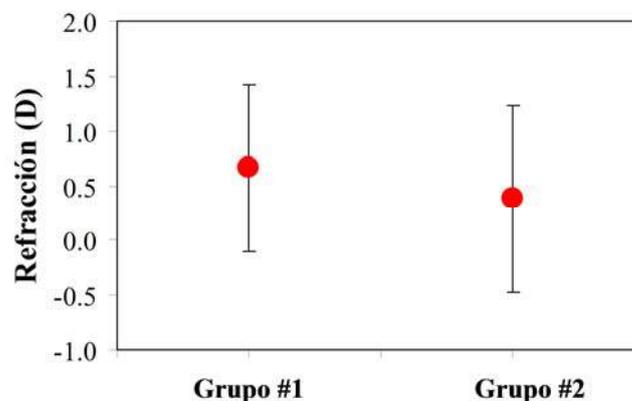


Figura 3.8. Valores medios de ERO en los grupos #1 y #2. Las barras de error indican la desviación estándar.

3.3.2. Refracción ocular en ganado de lidia en vivo

Como ya se comentó anteriormente, debido a las dificultades para la medida de animales adultos en vivo, el grupo #3 estuvo solamente constituido por 14 ojos de 7 animales. Aunque el grupo es reducido, los resultados de refracción nos permitirán hacernos una idea de la fiabilidad de los resultados *post-mortem* expuestos en el apartado anterior. En concreto la Figura 3.9 muestra las refracciones medias para los animales en vivo (grupo #3) comparadas

con las de los animales *post-mortem* del grupo #1 (calculadas a partir de los datos de la Figura 3.3).

Los valores individuales en el grupo #3 se situaron entre -0.50 y +1.50 D, con una media de $+0.59 \pm 0.52$ D, lo que indica de nuevo una tendencia a la hipermetropía. La dispersión es menor que la encontrada en el grupo #1 posiblemente debido a que el número de ojos analizados es bastante más pequeño. La refracción en el OS fue ligeramente menor que en el OD, aunque las diferencias no fueron significativas ($p=0.31$). Tampoco hubo diferencias significativas entre los grupos #3 y #1. Hay que añadir que todos los animales del grupo #3 fueron también medidos en condiciones *post-mortem* tras su lidia. Las diferencias en el ERO nunca fueron mayores de 0.25 D, lo que corroboraría la validez de las medias realizadas en condiciones *post-mortem*.

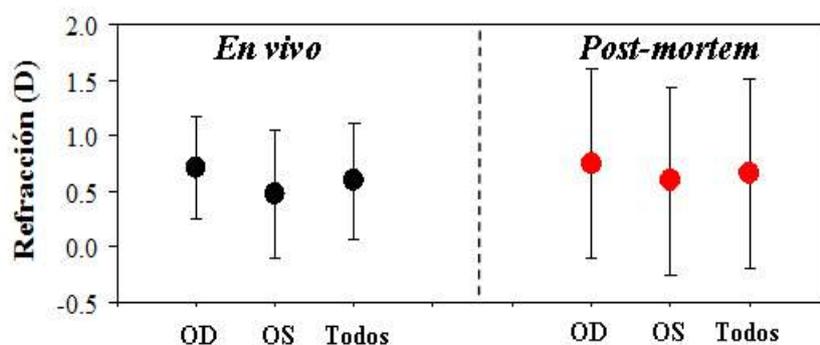


Figura 3.9. Comparación de los valores medios de ERO en los grupos #3 y #1. Las barras de error indican la desviación estándar.

A continuación se presentan los resultados correspondientes al grupo #4. Los valores de refracción para todos los animales de ese grupo separados en OD y OS se pueden observar en la Figura 3.10.

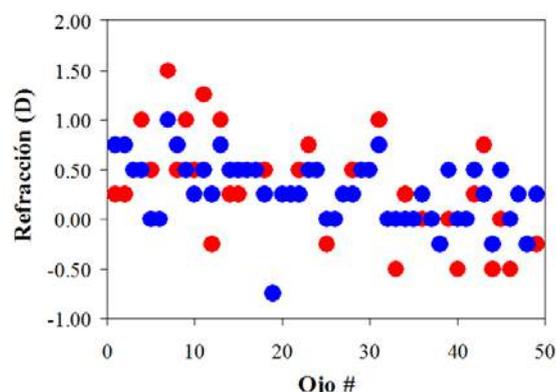


Figura 3.10. Valores del ERO para los 98 ojos del grupo #4. Los símbolos rojos y azules corresponden a OD y OS respectivamente.

Al igual que ocurría con el grupo #1, existe variabilidad interindividual, que en este caso va desde -0.75 hasta +1.5 D, con una media de $+0.28 \pm 0.44$ D, valor que claramente inferior al

encontrado en los animales adultos. En este grupo solamente se encontraron 5 ojos miopes ($ERO \leq -0.50$ D). La refracción media para fue $+0.28 \pm 0.49$ D para el OD y $+0.29 \pm 0.38$ D para el OS.

En estos animales se desconoce el peso, pero al igual que pasaba con el grupo #1, entre la edad y la refracción tampoco se encontró ninguna relación significativa ($p=0.12$). Por su parte la Figura 3.11 compara las refracciones entre ambos ojos. Los datos muestran una correlación lineal significativa ($R=0.75$, $p<0.0001$).

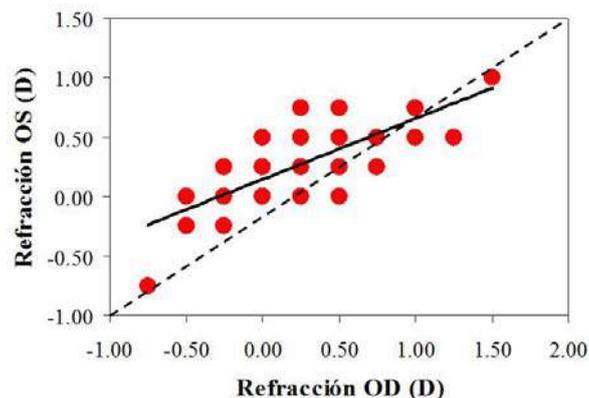


Figure 3.11. Comparación de los errores refractivos esféricos entre OD y OS en todos los animales del grupo #4. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($R_{OS}=0.51 * R_{OD} - 0.15$). La línea discontinua es la 1:1.

La distribución de los errores de refracción en todos los ojos se muestra en la Figura 3.12. A diferencia de los ojos de los animales del grupo #1 (Figura 3.6), la mayoría de los ojos de este grupo #4 (más del 75%) presentó errores de refracción menores de $+0.75$ D.

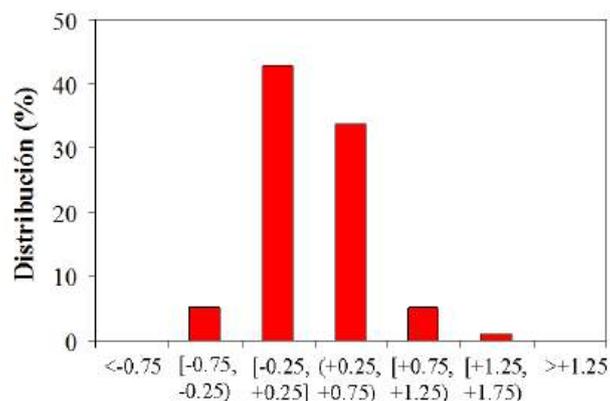


Figura 3.12. Distribución de los valores del ERO en todos los ojos del grupo #4.

La distribución de anisometropía se puede observar en la Figura 3.13. Para este grupo #4 los valores oscilaron menos que en el grupo #1, entre 0 y $+0.75$ D, con una media de $+0.27 \pm 0.28$ D.

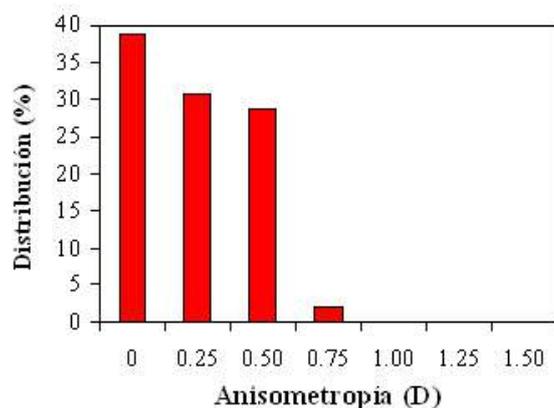


Figura 3.13. Distribución de anisotropía en los ojos del grupo #4.

3.3.3. Refracción ocular en ganado manso post-mortem

Los resultados de ERO para todos los ojos del grupo #6 medidos a lo largo del MH se presentan en la Figura 3.14.

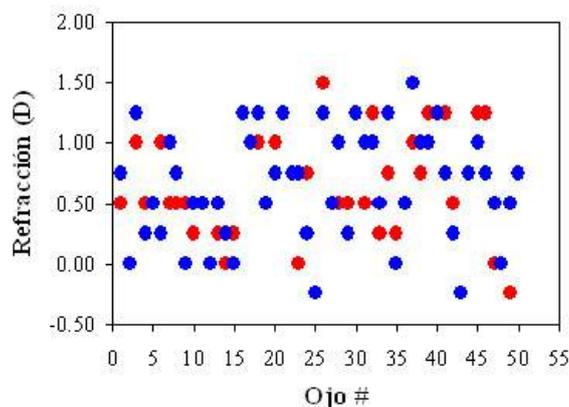


Figura 3.14. Valores del ERO para todos los ojos del grupo #6. Los símbolos rojos y azules corresponden a OD y OS respectivamente.

Para este grupo de animales los valores de refracción oscilaron entre -0.25 y +1.50 D, con una media de $+0.63 \pm 0.46$ D ($+0.62 \pm 0.47$ y $+0.65 \pm 0.45$ D para OD y OS respectivamente). Solamente 5 de los 100 ojos fueron miopes. Para este grupo también se encontró una relación significativa entre pares de ojos del mismo animal ($R=0.74$, $p<0.0001$) como muestra la Figura 3.15. Al igual que ocurría con los ojos del grupo #1, aquí tampoco se han encontrado relaciones significativas entre el ERO y la edad ($p=0.54$) o el peso de los animales ($p=0.71$).

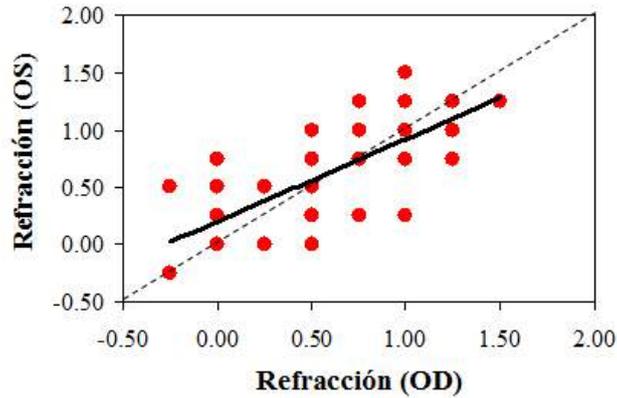


Figure 3.15. Relación entre los valores del ERO entre el OD y el OS en los 50 animales del grupo #6. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($R_{OS}=0.72 \cdot R_{OD}-0.20$). La línea discontinua es la 1:1.

En la Figura 3.16 se puede observar la distribución de los errores de refracción en todos los ojos del grupo #6 (barras verdes). Para una mejor comparación se han incluido también los datos del grupo #1 (Figura 3.6, barras rojas) y del grupo #4 (Figura 3.12, barras azules). En el caso del ganado manso, casi el 70% de los ojos presentó errores de refracción entre 0 y +0.75 D.

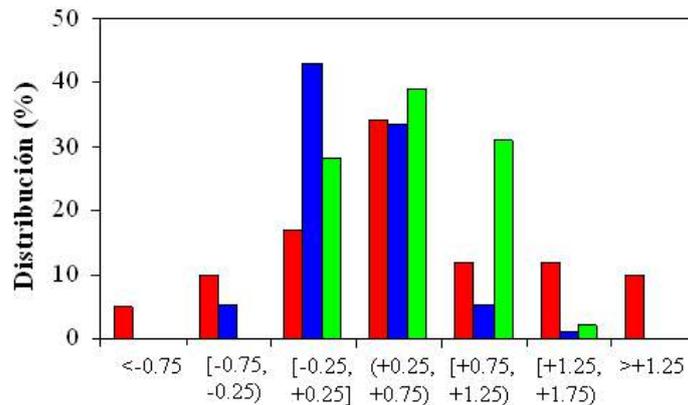


Figura 3.16. Distribución de los valores del ERO en los ojos del grupo #1 (barras rojas), #3 (barras azules) y #6 (barras verdes).

La Figura 3.17 compara las distribuciones de anisometropía en los mismos grupos que la figura anterior. En el ganado manso el valor medio fue de $+0.24 \pm 0.23$ D, oscilando entre 0 y +0.75 D.

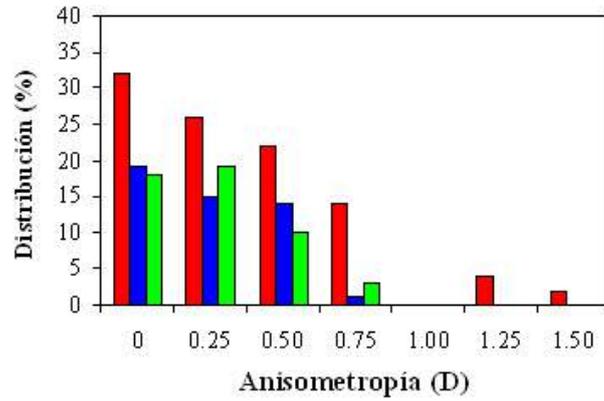


Figura 3.17. Distribución de anisotropía en los ojos de los grupos #1, #4 y #6. Las etiquetas de color son las mismas que en la figura anterior.

Como comparación general la Figura 3.18 muestra los valores medios de refracción para los ojos de los grupos #1, #3, #4 y #6.

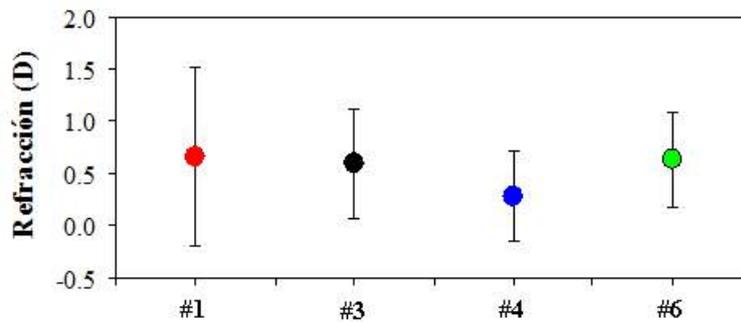


Figura 3.18. Valores medios de ERO para todos los ojos de los animales de los grupos #1 (rojo), #3 (negro), #4 (azul) y #6 (verde). Las barras de error indican la desviación estándar. Los datos en rojo y negro son los mismos que en la Figura 3.9.

3.3.4. Refracción ocular a lo largo de dos meridianos perpendiculares en ganado de lidia post-mortem

Para comprobar la presencia de astigmatismo en el ojo del toro de lidia, la Figura 3.19 compara los valores de la refracción esférica neta medidos a lo largo de los MH y MV para todos los ODs del grupo #5. Al igual que en el grupo #1, existe cierta variabilidad interindividual, en este caso con valores que oscilaron entre -0.75 y +1.25 D para el MH, con una media de $+0.69 \pm 0.45$ D. Para todos los ODs el MV siempre fue “más miope” que en MH (ERO promedio de -0.06 ± 0.45 D, con valores en el rango entre -1.25 y +0.75 D). Lo mismo ocurrió en el OS. Para una mejor comparación la Figura 3.20 muestra los valores medios del ERO para ambos ojos y meridianos en los ODs.

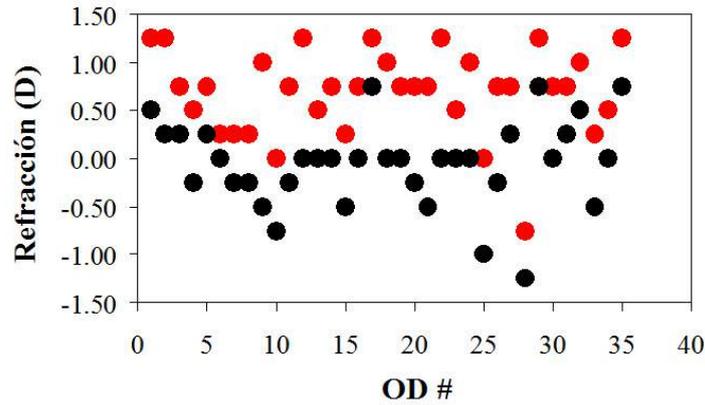


Figura 3.19. Valores del ERO medidos a lo largo del MH (rojo) y del MV (negro) en los ODs del grupo #5.

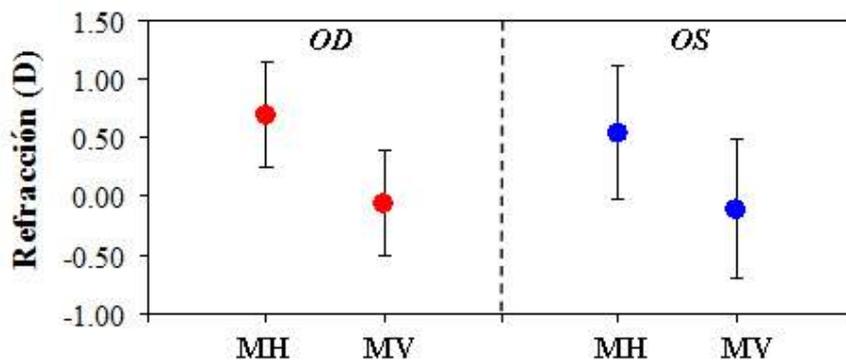


Figura 3.20. Valores medios de ERO para ambos meridianos en el OD (rojo) y el OS (azul) de los animales del grupo #5.

Definiendo el astigmatismo como la diferencia entre las refracciones medidas a lo largo de los dos meridianos ($R_{MH} - R_{MV}$), la Figura 3.21 muestra dichos valores para todos los ojos. Los valores medios resultaron ser $+0.75 \pm 0.29$ D para el OD y $+0.70 \pm 0.32$ D para el OS.

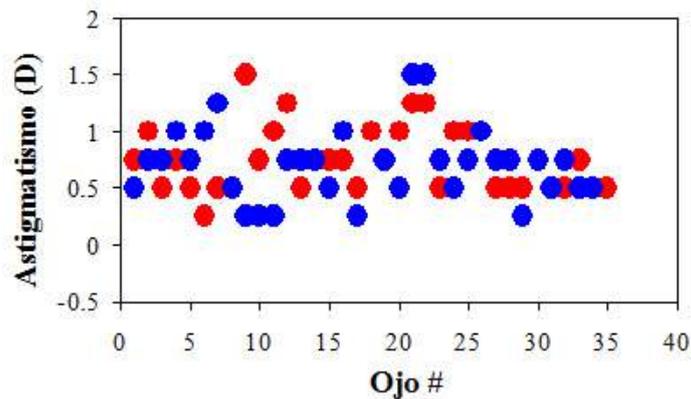


Figura 3.21. Valores de astigmatismo para todos los ojos del grupo #5. Los símbolos rojos y azules corresponden a OD y OS respectivamente.

Finalmente los valores de la potencia de la esfera equivalente calculados como la semi-suma de las potencia de ambos meridianos se presentan en la Figura 3.22. Para el OD el valor medio fue $+0.31 \pm 0.43$ D y $+0.27 \pm 0.46$ D para el OS.

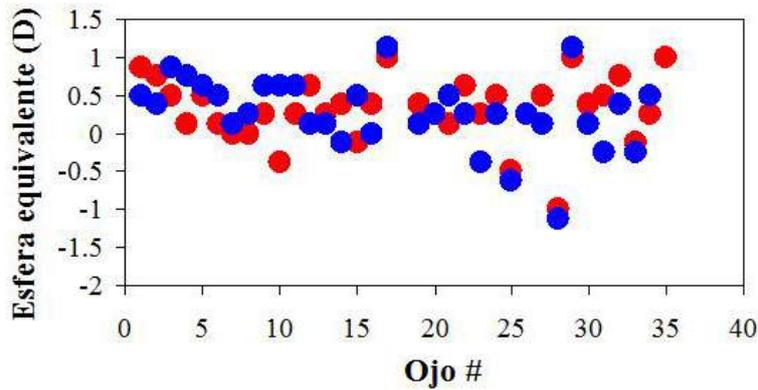


Figura 3.22. Valores de la esfera equivalente para todos los ojos del grupo #5. Las etiquetas de color son las mismas que en la figura anterior.

3.4. Discusión

En este capítulo se ha utilizado un retinoscopio de franja para medir el ERO de los ojos de dos especies diferentes de bovinos: toro de lidia (tanto en condiciones *post-mortem* como en vivo) y ganado bovino manso (sólo en condiciones *post-mortem*). Hasta donde el autor de esta Tesis Doctoral sabe, no se han realizado estudios para examinar el ERO en bovinos, con lo que los resultados aquí presentados no se puede comparar con literatura previa. Algunos autores han reportado datos sobre la AV en ganado bovino manso, utilizando procedimientos psicofísicos y métodos de aprendizaje discriminatorio (véase el apartado 1.3 para más información). Todos coinciden en una baja AV (<0.1) [Entsu et al., 1992; Rehkämper et al., 2000], pero no mostraron datos sobre el ERO.

3.4.1. Refracción ocular en el meridiano horizontal

Los resultados en condiciones *post-mortem* del ERO medido a lo largo del MH muestran una ligera tendencia hacia la hipermetropía, con valores medios de $+0.63 \pm 0.46$ D para el ganado manso y de $+0.66 \pm 0.85$ D para el toro de lidia. Se encontró que aproximadamente el 70% de los ojos de ambas especies de bovino estaban en el rango entre $+0.50$ y $+1.50$ D.

Se ha comprobado que los cambios en la presión intraocular no fueron significativos y se sabe que los bovinos tienen poca o ninguna capacidad de acomodación [Prince et al., 1960; Baldwin, 1981]. Esto apoyaría la extrapolación de las medidas *post-mortem* a medidas en vivo. Además, estos resultados *post-mortem* son consistentes y fiables por las siguientes razones. Por una parte ha quedado experimentalmente corroborado que los valores del ERO en vivo realizadas en los animales del grupo #3 (utreros, ERO promedio de $+0.59 \pm 0.52$ D) son similares y sin diferencias significativas a los obtenidos en el grupo #1 (véase la Figura 3.9). Por otra parte, hay que añadir además que en los animales del grupo #3 se midió el ERO

tanto en vivo a la hora del enfundado como *post-mortem* tras la lidia, encontrándose diferencias mínimas que nunca superaron el propio error experimental (± 0.25 D).

En la literatura consultada se ha encontrado un elevado número de estudios sobre el ERO de diferentes animales, incluyendo mamíferos, reptiles y pájaros. Animales domésticos tales como gatos y perros han resultado ser miopes (-0.78 ± 1.37 D) [Konrade et al., 2012] y emétopes (-0.05 ± 1.36 D) [Kubai et al., 2008] respectivamente. El ERO de los perros depende de la raza, y las razas que realizan actividades que requieren una mayor habilidad visual están más cerca de la emetropía. Mamíferos de gran tamaño como el elefante [Murphy et al., 1992b] y el caballo [Rull-Cotrina et al., 2013] son prácticamente emétopes (0.23 y -0.17 D, respectivamente). Además, en estos animales no se observaron diferencias entre los ojos dilatados y no dilatados. La gacela resultó ser emétope ($+0.03$ D) [Ofri et al., 2004] y el rinoceronte ligeramente hipermétope (entre $+0.75$ y $+1.50$ D) [Howland et al. 1993]. Las focas son miopes en el aire, pero emétopes o ligeramente hipermétopes bajo el agua [Hanke et al., 2006]. Pequeños mamíferos como ratas o ratones resultaron ser claramente hipermétopes ($\sim +10$ D) [Hughes, 1977b; García de la Cera et al., 2006].

Aparte de factores como la genética o la raza, la edad podría tener una influencia importante en el ERO tanto en los seres humanos como en animales. Se ha reportado que el ERO cambia con la edad en gatos [Konrade et al., 2012], perros [Kubai et al., 2008], avestruces [Ofri et al., 2001], pollos [Irving et al., 1996], ratones [Zhou et al., 2008], conejillos de indias [Zhou et al., 2006], gacelas [Ofri et al., 2004], monos [Bradley et al., 1999] y seres humanos [Saunders, 1984].

En este trabajo no se ha encontrado una relación significativa entre la edad del animal y el ERO en los grupos de cuatreños (#1), becerros y añojos (#4) y ganado manso (#6) probablemente debido al reducido intervalo de edad. Entre los toros cuatreños y utrerros (grupo #2) tampoco hubo diferencias en el ERO.

Sin embargo, cuando se comparan los grupos #1 y #4 se pueden apreciar diferencias. Por ejemplo, mientras que en el grupo de toros cuatreños el 55% de los ojos presentaba errores de refracción entre -0.25 y 0.75 D, en becerros y añojos sube hasta el 75% (véanse Figuras 3.6 y 3.12). En términos generales, los valores medios aumentan de $+0.28 \pm 0.44$ D en el grupo #4 hasta $+0.66 \pm 0.85$ D en el #1 (Figura 3.18). Puesto que las diferencias entre los dos grupos de animales fueron significativas, esto indica que sí hay cambios en el ERO en la raza de lidia. Teniendo en cuenta estos resultados se puede decir que el toro de lidia tiende a hacerse más hipermétope con la edad. De hecho, en los animales aquí estudiados el ERO en promedio duplica su valor entre los 13 y los 54 meses.

Este cambio en el ERO puede estar relacionado tanto con el tamaño del globo ocular como con la potencia de la córnea (fundamentalmente su radio de curvatura). No se han encontrado datos sobre estos parámetros en la literatura y su relación con la edad. Sin embargo en el Capítulo 4 se analizarán la variación de la longitud axial del ojo con la edad en los toros de lidia. Esto nos informará sobre la evolución del globo ocular en el ganado de lidia y los posibles cambios que pueden ocurrir en el ERO con el tiempo.

A diferencia del ganado manso (que crece en las explotaciones ganaderas intensiva), el toro de lidia se selecciona genéticamente y pasa su vida al aire libre en grandes extensiones valladas. En este sentido, la evaluación de las ERO en estas dos razas de bovino podría ayudar a aclarar y determinar si el medio ambiente y las actividades diarias conducen a determinados errores de refracción [Belkin et al., 1977; Mutti et al., 2002; Shen and Sivak, 2007; Ashby and Schaeffel, 2010]. Medidas en gatos muestran que los gatos enjaulados son principalmente miopes (-0.8 D en media), mientras los gatos callejeros tienden a ser hipermétropes (+1.4 D). También se ha podido confirmar que el ERO depende de la raza, tanto en perros [Kubai et al., 2008] como en caballos [Rull-Cotrina et al., 2013].

Los valores promedio del ERO en el ganado manso aquí presentados no difieren significativamente de los de los toros de lidia (Figura 3.18) y ambas razas tienden a ser ligeramente hipermétropes. Sin embargo, hay que destacar que la variabilidad interindividual fue mucho mayor en los toros (entre -1.0 y +2.5 D) que en el ganado manso (entre -0.50 y +1.50). Esta variabilidad podría estar influenciada por las diferencias medioambientales o las actividades diarias entre ambos grupos de animales. Esto abre las puertas a futuros trabajos centrados en medidas del ERO en grupos de ganado manso con edades parecidas al grupo de toros de lidia aquí analizados, como por ejemplo animales de granjas destinadas a la explotación lechera.

3.4.2. Astigmatismo

Todo lo discutido en el apartado anterior corresponde a las medidas del ERO realizadas a lo largo del MH, sin embargo, en el apartado 3.3.4 se han expuesto los resultados de medidas de refracción tanto en el MH como en el MV. No ha sido objeto de estudio analizar cuáles son los meridianos principales de dicho astigmatismo, sino estudiar la refracción a lo largo de dos meridianos perpendiculares como un paso adicional en la caracterización del ERO en el toro de lidia.

Los datos mostrados no dejan lugar a dudas: el ojo del toro de lidia presenta astigmatismo. Un 25% de los ojos analizados han presentado un astigmatismo ≥ 1 D. A pesar de la

variabilidad individual (a la que también se apuntó en las medias del grupo #1), los valores de astigmatismo ($ERO_{MH}-ERO_{MV}$) encontrados son bastante homogéneos. En concreto el valor medio para los animales del grupo #5 fue de $+0.73\pm 0.30$ D. Esto indica que el MH es más hipermetrope que el MV. En este punto es interesante destacar que el MV es prácticamente emétrepe tanto en el OD (-0.06 ± 0.45 D) como en el OS (-0.11 ± 0.60 D).

La razón por la cual el MV podría ser emétrepe es la combinación del comportamiento óptico de un sistema astigmático con la existencia de un *visual horizontal streak* en la retina de los bovinos. En un sistema óptico astigmático el MV tiene asociada las imágenes en la dirección horizontal (y a la inversa). De esta forma las imágenes que corresponden a este meridiano estarían enfocadas justamente sobre la zona de mayor sensibilidad visual de la retina. Las imágenes del MH estarían orientadas en posición vertical y se situarían detrás de dicha retina por ser el MH hipermetrope. Es posible que la pupila ovalada de estos animales esté también ligada a la presencia de astigmatismo, pero las medidas aquí realizadas no nos permiten de momento ligar ambas condiciones.

Sin embargo, desde el punto de vista de la función visual quizás la forma más apropiada de entender el comportamiento del ojo como sistema astigmático es analizar la posición del círculo de mínima confusión. Como ya se dijo en el Capítulo 1, este círculo corresponde a la “mejor imagen” que puede proporcionar un sistema óptico de este tipo, o dicho de otra forma, es la imagen “más parecida” a un punto (de hecho es una mancha) que de un objeto puntual proporcionaría una superficie astigmática. En términos optométricos se conoce como la esfera equivalente y se correspondería con la “imagen más nítida” que se puede ver de un objeto lejano sin la corrección del astigmatismo. La potencia de la esfera equivalente se calcula como la semi-suma de las potencias a lo largo de los dos meridianos principales (a todos los efectos MH y MV en este trabajo). Teniendo en cuenta los valores del ERO para ambos meridianos, el valor medio de la potencia de la esfera equivalente para el OD sería $+0.31\pm 0.43$ D y para el OS $+0.27\pm 0.46$ D. Estos valores indican que el ojo del toro de lidia en su conjunto tendría una hipermetropía de $\sim +0.25$ D.

Teniendo en cuenta este “valor promedio” de hipermetropía, este tipo de animales necesitaría justamente 1/4 de dioptría para poder ver objetos lejanos nítidamente. Las numerosas experiencias con este tipo de animales tanto en las ganaderías como en el mismo ruedo muestran que no son miopes, es decir “ven bien” de lejos. Para que esto ocurra el cristalino ha de compensar esta pequeña ametropía, lo cual no parece muy descabellado. La pregunta ahora sería: ¿Es capaz el toro de lidia de ver a diferentes distancias de forma “nítida”? Para responder a esta pregunta se ha de recordar como ya se ha dicho anteriormente

que los bovinos no tienen prácticamente acomodación. Si esto se entiende como que las características del cristalino son similares a las de un ojo humano presbita, se le podría dejar una acomodación remanente de 2 D. En estas condiciones esto indicaría que el toro de lidia podría ver de forma “nítida” desde una distancia lejana hasta aproximadamente unos 60 cm. Sin embargo, también es posible que la geometría del cristalino le aporte aberración esférica al ojo, con lo cual aumentaría la profundidad de foco y no haría falta, hasta cierto punto, la acomodación para ver de cerca puesto que el ojo del toro actuaría como una cámara de foco fijo.

3.4.3. Refracción ocular y tauromaquia: el toro burriciego

En el apartado anterior se ha discutido sobre el astigmatismo del ojo del toro de lidia llegando a un valor promedio de esfera equivalente de +0.25 D. Sin embargo no se han discutido los valores individuales obtenidos en los diferentes animales. En la muestra de ojos que forman el grupo #5 los valores de esfera equivalente oscilaron entre -1.125 y +1.25 D. Esto indica que hay toros que son miopes y otros que son hipermétropes (y por supuesto emétropes). De esta forma, si se usa el argumento del cristalino del final del párrafo anterior, hay animales que podrían ver a todas las distancias, otros que verían bien de lejos y mal de cerca, y otros que vería mal de lejos pero bien de cerca. Podría darse el caso extremo de animales que no viesen bien a ninguna distancia (es el caso en el que la potencia del cristalino no puede compensar la hipermetropía existente).

La Tabla 3.1 resume los resultados de ERO (en términos de esfera equivalente) donde se han considerado ojos emétropes aquellos con esferas equivalentes en el rango [-0.25, +0.25] D, miopes aquellos con ≤ -0.25 D e hipermétropes $\geq +0.25$ D.

REFRACCION OCULAR		Nº Ojos	%
Emetropía		27	38.6
Ametropía	Miopía	7	10.0
	Hipermetropía	36	51.4
Total		70	100.0

Tabla 3.1. Distribución de errores refractivos en los ojos del grupo #5.

En esta tabla se observa que aproximadamente la mitad de los ojos son hipemétropes y que solamente un 10% son miopes. Estos resultados confirmarían por primera vez de forma experimental la clasificación de los toros burriciegos, es decir, “defectuosos de la vista” en términos taurinos, expuesta en la Introducción de este Capítulo 3 [Cossío, 1974; Selarom, 2009].

Esta tendencia del ERO del toro de lidia a ser ligeramente hipermetrope (aspecto que ya se destacó en el apartado 3.4.1 con las medidas solamente en el MH) difiere totalmente de la apreciación “clásica” de una miopía congénita en el toro de lidia [Sanz Egaña, 1958; Paños Martí, 1965]. Sin embargo, los resultados son coherentes con la información aportada por Martín Roldán que atribuía la hipermetropía a la propia morfología anatómica del ojo [Martín Roldán, 1965]. Esta afirmación no es totalmente correcta, pues el ERO es resultado de la combinación de la potencia de los elementos refractivos oculares (córnea y cristalino) y la longitud axial.

Si ligamos estos resultados con lo que ocurre en el ruedo, se puede llegar a entender aspectos importantes que han estado siempre presentes en el ámbito taurino. Durante las corridas, los toreros y el público a menudo se quejan al Presidente del festejo sobre el rendimiento visual de los toros (el reglamento español permite esto, pero sólo el Presidente puede tomar la decisión final de cambiar el animal por otro). Se ha descrito históricamente (sin base científica evidente) que muchos de los comportamientos fuera de lo normal del toro durante la lidia son debidos a que son burriciegos, es decir, presentan distintos tipos de alteraciones en la vista. En este punto no es difícil interpretar que dichas alteraciones y ligarlas, aunque no exclusivamente, a defectos de refracción ocular. Sin embargo, no hay que olvidar que existen otras circunstancias, que sin ser ametropías, pueden afectar a la imagen retiniana y reducir la calidad visual (catarata, edema corneal, desprendimiento de retina, etc...).

Resulta razonable que el hecho de que el animal muestre un evidente problema de visión (cerca o lejos) conlleve un comportamiento impredecible que puede exponer al torero a un riesgo excesivo por encima de lo que está acostumbrado. Puesto que los valores de refracción van desde la miopía hasta la hipermetropía, se podría pensar que aquellos relativamente lejos de la emetropía pueden ser responsables de este comportamiento atípico que se puede observar sólo cuando el animal está sobre el albero de la plaza.

Por un lado, y con algunas matizaciones (especialmente sobre acomodación que no es objeto de esta Tesis Doctoral), la aportación de que *los toros burriciegos que ven poco de cerca y mucho de lejos*, podría corresponder con un estado refractivo hipermetrope. Por lo tanto, siendo el estado de refracción de los ojos del toro de lidia hipermetrope en su mayoría, y con ello la caracterización general en la raza, se hace difícil explicar solamente con este parámetro la condición de ser los más peligrosos [Cossío, 1974] en su comportamiento para ser lidiados.

Por otro lado, aquellos toros burriciegos clasificados como *los que ven mucho de cerca y poco o nada de lejos*, podrían ser aquellos en los que el estado refractivo de sus ojos se corresponde con una miopía. En la muestra analizada un pequeño grupo de ojos es miope.

Con el fin de analizar una posible simetría entre los dos ojos también se ha estudiado la anisometropía en los diferentes grupos de animales. En general el OD tiende a ser más hipermetrope que el OS aunque las diferencias nunca han sido estadísticamente significativas en los grupos de animales aquí estudiados. Sin embargo, de forma individual se han encontrado casos en los que la anisometropía ha sido de 1.50 D. Esto estaría ligado con otra de las acepciones de toro burriciego, que se describe como la de aquellos que *ven bien de un ojo y mal de otro*. Este desequilibrio entre pares de ojos podría conducir a problemas con el desarrollo de la visión binocular, habiéndose también detectado en los seres humanos [Ciuffreda et al., 1991], caballos [Rull-Cotrina et al., 2013] y monos [Qiao-Grider et al., 2010].

Por otra parte, los experimentos con ganado manso han revelado importantes preferencias a estímulos presentados delante del ojo izquierdo [Robins y Phillips, 2010]. Esta lateralización visual se refiere al uso principal del hemisferio derecho del cerebro y también se ha encontrado en perros y pollos [Tomkins et al., 2010; Andrew and Rogers, 2002]. En el cerebro de los vertebrados el hemisferio derecho está especializado a responder rápidamente a señales definidos en el entorno cercano, mientras que el hemisferio izquierdo está especializado en las decisiones relativas a señales abstractos o repetitivos [Andrew and Rogers, 2002; Vollartigara and Rogers, 2005; Robins and Phillips, 2010]. El toro de lidia ha sido seleccionado para responder rápidamente a un estímulo (por lo general la muleta o el capote) durante la lidia. Aunque la respuesta, por lo general es diferente entre animales, la mayoría de los toreros tienden a mostrar el engaño delante del ojo izquierdo con más frecuencia ya que (en sus propias palabras) "el animal se comporta mejor". Esto podría estar asociado con el uso preferente del campo visual izquierdo controlado por el hemisferio derecho como ya se ha reportado en otros bovinos [Robins and Phillips, 2010].

Las medidas presentadas en este Capítulo 3 no son suficientes para ahondar en este tema de la lateralidad. Aunque son necesarios más observaciones y experimentos, los resultados aquí expuestos muestran la existencia de forma individual y puntual de un desequilibrio refractivo entre los ojos del toro de lidia que podría contribuir a la existencia de preferencias laterales que, claramente afectarían, el comportamiento del animal. Dicho de otra forma, en este punto la pregunta que quedaría en el aire sería: ¿es la anisometropía refractiva una de las razones por las que el toreo se pueda llevar a cabo por "naturales" o por "derechazos"?

Anatomía Ocular



CAPÍTULO 4

Aspectos Novedosos sobre la Anatomía Ocular del Toro de Lidia

4.1. Introducción

4.1.1. Longitud axial del ojo

El cálculo de las dimensiones de las estructuras del ojo (biometría ocular) ha sido una de las primeras aplicaciones de la ultrasonografía en el campo de la oftalmología. Con ella se pueden medir las dimensiones axiales del ojo, así como las de los componentes individuales, tales como la córnea y el cristalino [El-Maghraby, 1995].

La medida de la longitud axial del ojo es apropiada para evaluar el tamaño del globo ocular, tanto por su estrecha correlación con la potencia de la óptica ocular en la determinación del ERO, como porque dicho tamaño aporta información sobre otros parámetros anatómicos [Murphy and Howland, 1987]. Desde el punto de vista óptico la medida de la longitud axial del ojo es útil tanto para el análisis del ERO como para el desarrollo de modelos esquemáticos de ojo [Murphy and Howland, 1987; Coile and O'Keefe, 1988]. Por su parte, la potencia ocular determina el tamaño de la imagen sobre la retina y, aunque la frecuencia espacial de muestreo de ésta (básicamente la densidad de células fotorreceptoras) cambia con la excentricidad retiniana, dicha potencia está directamente relacionada con la cantidad de información visual que llega al cerebro [Howland et al., 2004]. Esto hace que la medida de la longitud axial sea importante para un análisis completo de la visión.

Los estudios sobre la longitud axial no solamente se ha restringido a mamíferos [Hamidzada and Osuobeni, 1998; Paunksnis et al., 2014; Ribeiro et al., 2009] y primates

[Altman, 1962; Hughes, 1977a; Hughes, 1979], sino que también se han realizado en aves [Brooke et al., 1999], anfibios [Mathis et al., 1988; Rochon-DuVigneaud, 1943], peces [Rochon-DuVigneaud, 1943] y reptiles [Northmore, 1991; Ruiz et al., 2015].

En el caso de bovinos, la longitud axial se ha medido tanto con técnicas histológicas como con ultrasonidos. En condiciones *post-mortem*, los resultados fueron 33.2 mm [El- Maghraby, 1995] y 34.37 mm [Prince et al., 1960] con la primera técnica y 31.3 mm [El- Maghraby, 1995], 35.5 mm [Getty et al., 1998] y 38.00 mm [Freeman, 1963] con la segunda. Los resultados varían de unos autores a otros no sólo por la naturaleza de la técnica sino por las diferentes razas y edades de los animales medidos (que en algunos casos ni siquiera se especificó). Medidas en vivo con ultrasonidos mostraron valores de 34.6 mm y 32.7 mm para las razas Frisona y Jersey respectivamente [Potter et al., 2008]. Estos resultados obtenidos en vivo no difirieron significativamente de los obtenidos *post-mortem* [Potter et al., 2008] aunque se ha verificado que la córnea disminuye de espesor inmediatamente después de la muerte y vuelve a recuperar su espesor durante los siguientes 30 minutos [El-Tookhy y Tharwat, 2013]. Sin embargo, dicho espesor corneal aumenta significativamente tras 24 horas de la muerte del animal debido posiblemente a un proceso de edematización [Svaldenienė et al., 1998].

El análisis biométrico con ultrasonidos también ha revelado que existen similitudes entre la estructura de los ojos de rumiantes como la vaca y el búfalo [Assadnassab y Fartashvand, 2013]. En ambos casos la longitud de la cámara anterior (6 mm) y la longitud del cuerpo vítreo (19 mm) constituyen cerca del 65% de la longitud axial total (38 mm) [Freeman, 1963].

En la literatura consultada no se han encontrado datos sobre la longitud axial del ojo del toro de lidia. En ese sentido, en la primera parte de los resultados del presente capítulo se analiza dicho parámetro teniendo en cuenta la edad de los animales para establecer una posible relación y poder conocer, si ha lugar, la edad a la cual el tamaño del globo ocular de estos animales se estabiliza, por llegar posiblemente a su etapa adulta. Para su medida, en lugar de la conocida técnica de ultrasonidos, se ha usado un instrumento basado en interferometría con luz infrarroja.

4.1.2. Estructura retiniana y células fotorreceptoras

La densidad y distribución de las células fotorreceptoras en la retina está directamente relacionada con la AV y con el campo visual. De esta forma, en términos generales, cuanto mayor sea la densidad de células, mayor será la AV. Por otra parte, cuanto más área ocupen las células fotorreceptoras mayor será la extensión del campo visual.

En 1974, se reportó que la zona central de la retina del buey mostraba similitudes con la de otros rumiantes [Karamanlidis and Magras, 1974]. Sin embargo era destacable que dichas retinas exhibían un *horizontal streak* muy marcado en una zona dorsal con respecto al nervio óptico donde se concentra una gran cantidad de células ganglionares [Hebel, 1976]. Como regla general la máxima densidad se sitúa en el extremo temporal de dicho *streak*. También se han llevado a cabo estudios exhaustivos sobre el tamaño y distribución de células ganglionares en la retina del bovino [Hebel and Holländer, 1979]. Posteriormente se han calculado los valores de densidad de células ganglionares e incluso se han dado datos numéricos de AV [Heffner and Heffner, 1992].

A pesar de que en el Capítulo 1 se resumieron algunos de los aspectos esenciales de la retina del bovino, básicamente todos los datos corresponden a estudios histológicos. Dejando de lado la microscopía convencional, hoy en día hay tres técnicas que destacan a la hora de registrar imágenes del fondo del ojo o de estructuras retinianas: (1) la Oftalmoscopia Láser Confocal, SLO (del inglés, *Scanning Laser Ophthalmocopy*) [Webb et al., 1987], (2) la Tomografía de Coherencia Óptica, OCT (del inglés *Optical Coherence Tomography*) [Huang et al., 1991] y (3) la microscopía multifotónica [Denk et al., 1990].

En este Capítulo 4 se utilizarán las dos últimas para ir un paso más allá en la visualización de la retina del bovino. Aunque estas técnicas de última generación en este trabajo no aporten excesiva información cuantitativa, sí constituyen un avance en la caracterización del sistema visual del bovino en general y del toro de lidia en particular.

4.2. Métodos

4.2.1. Sistemas experimentales

I. Interferometría de coherencia parcial: Instrumento clínico IOL Master

La determinación de las distancias intraoculares, especialmente la longitud axial del ojo, es necesaria en procesos relacionados con la cirugía oftalmológica, como es el caso de la cirugía de cataratas [Ademwada et al., 2005]. Hasta hace unos años, la técnica de ultrasonidos A-Scan a 10 MHz era la técnica más extendida. La resolución longitudinal de dicha técnica es aproximadamente de 200 μm [Olsen, 1990; Bamber and Trstam 1988]. Con el uso de ultrasonidos de alta frecuencia es posible alcanzar una resolución de 20 μm con una profundidad de penetración de hasta a 4 mm [Pavlin, 1992]. En estas condiciones, sólo las estructuras más externas del ojo pueden ser detectadas con esta resolución. En general la resolución clásica de las técnicas de ultrasonidos se considera entre 100 y 120 μm [Kavan et

al., 1991; Schachar et al., 1980], demasiado baja para satisfacer las necesidades de los oftalmólogos antes de una intervención de cataratas donde se pretende sustituir el cristalino por una lente intraocular y que ésta sea la correcta para corregir el ERO del ojo intervenido.

Debido a este inconveniente, desde la década de los ochenta del siglo pasado se comenzó a estudiar la posibilidad de medir distancias intraoculares mediante una nueva técnica que constituía un terreno fértil para la investigación y el desarrollo: la interferometría de coherencia parcial (PCI, del inglés *Partial Coherence Interferometry*) [Hitzenberger, 1991]. El fundamento teórico de este método no es otro que el del uso del fenómeno de interferencia para medir distancias utilizando luz infrarroja. El uso de la PCI para la medida de la longitud axial del ojo humano fue reportado en 1988, por un colectivo de científicos del *Institut für Medizinische Physik* de la Universidad de Viena [Fercher, 1988]. Un esquema del instrumento se muestra en la Figura 4.1.

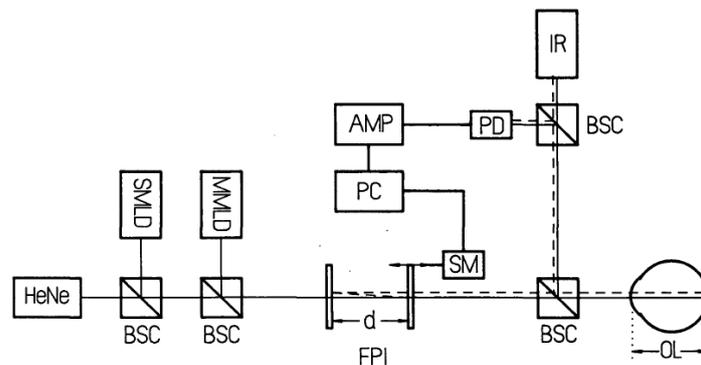


Figura 4.1. Esquema del primer interferómetro de coherencia parcial. Detalles sobre los diferentes elementos se pueden consultar en [Hitzenberger, 1991].

Las medidas biométricas utilizando la PCI se han difundido ampliamente gracias a la comercialización del IOL Master de la compañía Carl Zeiss Meditec, que es el instrumento clínico utilizado en este trabajo (Figura 4.2).



Figura 4.2. Instrumento clínico IOL Master utilizado para la medida de la longitud axial ocular (www.zeiss.com).

Este dispositivo clínico es básicamente un interferómetro en el que un haz de 780 nm se divide en dos, uno de ellos funciona como haz de referencia y se refleja en un espejo, y el otro atraviesa y se refleja en las estructuras oculares. A partir de la interferencia de ambos y teniendo en cuenta los índices de refracción se puede obtener información sobre las distancias geométricas entre dichas estructuras y en particular, el dato de longitud axial.

La resolución longitudinal actual del IOL Master (10-20 μm), unida a su fiabilidad, su exactitud y la seguridad de las medidas, lo han convertido en el referente de la biometría ocular moderna. El instrumento permite calcular la longitud axial total y la profundidad de la cámara anterior, además de servir como queratómetro [Tehrani et al., 2003; Findl et al., 2003].

II. Tomografía de coherencia óptica: Instrumento OCT clínico

La OCT es una técnica de imagen no invasiva para el estudio de tejidos biológicos con una resolución entre los ultrasonidos y la microscopía convencional. El concepto de OCT comenzó a revolucionar las imágenes de la retina a principios de los años 90 del siglo XX, debido a la colaboración entre oftalmólogos y los miembros del grupo del Prof. James Fujimoto del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) [Huang et al., 1991].

El funcionamiento de la OCT es hasta cierto punto similar a los instrumentos de ultrasonidos (ecógrafos) utilizados en las clínicas, aunque a diferencia de éstos, no requiere contacto directo con los tejidos a explorar. Sin embargo, la diferencia fundamental radica en el tipo de señal utilizada como referencia. En lugar de señales de sonido, la OCT utiliza la luz infrarroja que se refleja en los tejidos que componen la muestra estudiada. Dicha luz reflejada se hace interferir con un haz de referencia. Su objetivo es medir el “retardo del eco” y la intensidad de la luz reflejada en las diferentes estructuras internas en lugar de leer las ondas acústicas.

Puesto que la velocidad de la luz es muy alta, la medida de los “ecos ópticos” no es directa. Tal es así que el “corazón” del OCT es un interferómetro de Michelson (Figura 4.3) iluminado por una fuente de luz de baja coherencia (lo más extendido es el uso de un diodo superluminiscente). El interferograma obtenido está esencialmente asociado con las distancias entre los distintos elementos (capas) de los tejidos. La muestra de tejido se coloca en una rama del interferómetro, y las reflexiones de la muestra se combinan (interfieren) con las reflexiones de un espejo de referencia. Para que se produzca dicha interferencia, el brazo del haz de referencia tendrá que desplazarse a lo largo de su eje axial para que el haz que de él procede recorra el mismo camino óptico que el haz que escanea la muestra. Una vez

producida la interferencia, ésta se recoge con el sistema de registro correspondiente (detector, espectrómetro,...) [Fercher et al., 2003; Drexler, 2004]. Solamente así es posible la detección de la interferencia óptica procedente de las diferentes profundidades de la muestra. La profundidad de la imagen dentro del tejido (dirección Z) está limitada por la atenuación óptica causada por la difusión y la absorción por parte de éste. Sin embargo, en la mayoría de los tejidos se puede llegar a una profundidad de 2 o 3 mm. Esta profundidad es similar a la que se obtiene con las imágenes de biopsia o con histología convencional.

Una gran ventaja de la OCT es que la imagen se puede obtener y mostrar en tiempo real. Además, el hecho de usar luz asegura una mayor resolución axial en comparación con el estándar típico de la ultrasonografía (en el orden de 1-15 μm frente a los 150-200 μm).

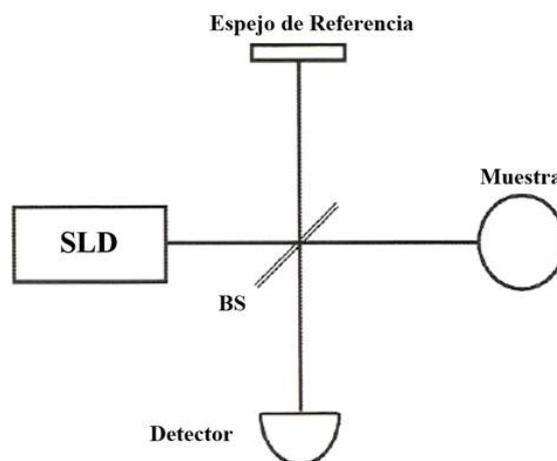


Figura 4.3. Esquema de un interferómetro de Michelson. Diodo superluminiscente, SLD; lámina separadora de haces o *beam splitter*, BS.

En particular, el ojo es una estructura particularmente adecuada para ser examinada con OCT, puesto que su transparencia permite una excelente calidad de imagen incluso de estructuras profundas como es el caso de la retina. De hecho, a día de hoy la aplicación OCT más extendida es en el campo de la oftalmología. En la Figura 4.4 se puede observar una tomografía de una retina humana sana que muestra un “corte óptico” transversal al tejido en cuestión (similar a un corte histológico típico) donde los distintos colores corresponden a las interferencias asociadas a las diferentes capas retinianas. En el campo de la OCT esta imagen bidimensional es un B-Scan y permite tanto medir espesores, como evaluar la estructura interna de los tejidos con el objetivo de emitir un diagnóstico clínico si fuera el caso. Estas son las representaciones que se utilizan con mayor frecuencia en entornos clínicos.

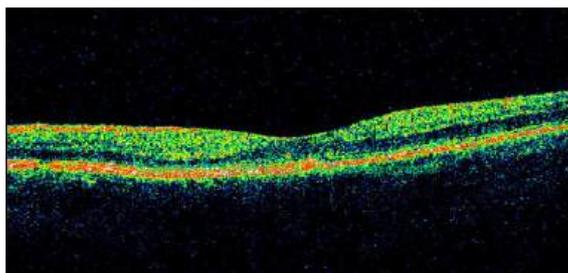


Figura 4.4. Ejemplo de imagen OCT de una retina humana sana (se puede apreciar claramente la depresión foveal en el centro). Los diferentes colores corresponden a las distintas estructuras retinianas.

Además del B-Scan, con la OCT se pueden obtener otros dos tipos de imágenes denominadas A-Scan y C-Scan. Las imágenes de A-Scan, o unidimensionales, analizan la reflectividad de las estructuras y su profundidad a lo largo de una sola dirección (un conjunto de A-Scans componen un B-Scan). Por su parte, un C-Scan es una imagen tridimensional formada por un conjunto de B-Scans.

Esencialmente, la OCT permite la obtención de imágenes mediante un método no invasivo, con alta resolución (incluso en vivo), en dos o tres dimensiones a partir de secciones transversales de tejidos transparentes (o no) *in situ*. En tejidos no transparentes, la capacidad de penetración de la luz se reduce notablemente.

En la actualidad existen numerosas empresas que fabrican OCTs clínicos orientados principalmente a la obtención de imágenes de la retina. Este tipo de imágenes OCT B-Scan se han difundido en la sociedad actual debido a la comercialización de estos instrumentos y a su uso diario en las clínicas oftalmológicas. Para los objetivos de este capítulo se ha utilizado el instrumento Topcon 3D OCT-2000 (Topcon Medical Laser Systems, Inc., Santa Clara, CA, EEUU) como el que se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5. Instrumento clínico utilizado para el registro de imágenes OCT de la retina del toro de lidia (www.topconmedical.com).

El sistema es de fácil manejo e incorpora una cámara de fondo de alta resolución (12.3 megapíxeles) con un campo de 45° que permite observar simultáneamente la localización retiniana y la imagen OCT registrada a tiempo real. La resolución en profundidad es de 5-6 μm y de 20 μm en la dirección transversal. La velocidad de registro es de 27.000 A-Scans/s y la profundidad de escaneo máxima de 2.3 mm. La longitud de onda de la fuente de luz es de 840 nm.

Los datos de las imágenes se disponen en forma de matriz donde cada elemento corresponde al valor de la intensidad de la señal en la zona correspondiente de la muestra. Estos valores se pueden exportar para trabajar con ellos. En el presente trabajo a partir de las imágenes proporcionadas se ha utilizado el *software* libre ImageJ para extraer las zonas de interés y calcular los parámetros necesarios.

III. Microscopía multifotónica: Dispositivo experimental

El fenómeno de la emisión de fluorescencia por absorción de dos o más fotones en átomos fue descrito por primera vez por Maria Goeppert-Mayer (premio Nobel de Física en 1963) en su tesis doctoral en el año 1931 [Goeppert-Mayer, 1931]. Este hecho fue comprobado experimentalmente en los años 60 del siglo pasado cuando estuvieron disponibles los primeros láseres de Rubí. Sin embargo no fue hasta 1990 cuando se habló de “microscopía multifotónica” resultado de la demostración de éste fenómeno sobre muestras biológicas [Denk et al., 1990].

En el fenómeno de fluorescencia lineal, utilizada en los microscopios convencionales, la molécula absorbe un fotón (normalmente azul o UV) y emite otro de menor energía. En este proceso puede producirse un desgaste interno de la molécula dando lugar al “blanqueo”, con lo que queda comprometida la capacidad para emitir fluorescencia. A diferencia de ésta, en la fluorescencia no lineal o a dos fotones (TPEF, del inglés *Two-Photon Excitation Fluorescence*) se absorben de forma cuasi-simultánea dos fotones infrarrojos (mayor longitud de onda que el azul). El primero de ellos hace que la molécula pase de su estado relajado hasta un estado “intermedio virtual” y el segundo lo excita hasta el estado de “excitación real” (Figura 4.6). Finalmente se emite un fotón de menor energía con una longitud de onda ligeramente mayor que la mitad de la longitud de onda que incide [Helmchen and Denk, 2005].

Para que se produzca este proceso TPEF, la fuente de iluminación debe aportar una gran densidad de fotones, en un corto espacio de tiempo y en un espacio reducido, es decir, debe de ser rápida e intensa, por lo que solamente se pueden usar láseres pulsados de femtosegundo.

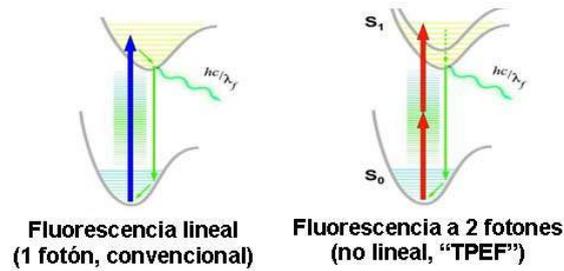


Figura 4.6. Fluorescencia lineal (izquierda) y a dos fotones (derecha).

Las técnicas de microscopía multifotónica no necesitan *pinhole* o diafragma, puesto que la absorción de dos fotones únicamente se produce en un volumen reducido, gracias a lo cual el daño en el tejido a estudiar es menor. Por lo tanto, es auto-confocal, y fuera de la zona de la muestra situada en el volumen focal la señal no lineal es casi nula, no se produce entonces blanqueado, y la resolución de la imagen es mayor. Dado que la excitación se lleva a cabo con fotones de longitudes de onda situadas en la zona del infrarrojo, éstos penetran más en el tejido y se pueden obtener imágenes de planos más profundos. La confocalidad inherente al proceso permite el seccionado óptico de la muestra y por tanto la reconstrucciones 3D de éstas. Una de las ventajas de este tipo de microscopía es sin duda la obtención de imágenes sin la necesidad de usar tinción (productos químicos exógenos) en las muestras, puesto que utiliza la fluorescencia endógena de la muestra a examinar.

A pesar de que el principal inconveniente de la microscopía multifotónica es el elevado coste que supone la fuente de iluminación pulsada y su mantenimiento, la técnica TPEF se ha convertido en herramienta muy útil para el estudio y la obtención de imágenes de alta resolución en los tejidos biológicos. En particular se ha utilizado con éxito para registrar imágenes de todas las capas de la retina en condiciones *ex-vivo* tanto en muestra humanas como en modelos animales [Bueno et al., 2010; Bueno et al., 2011].

Para el presente trabajo se ha utilizado el microscopio multifotónico desarrollado en el Laboratorio de Óptica de la Universidad de Murcia (LO·UM), descrito en [Bueno et al., 2010]. El sistema está desarrollado tomando como base un microscopio comercial invertido (Nikon TE2000-U, Tokio, Japón) al cual se le adjuntaron diversos elementos ópticos que se detallan a continuación. La fuente de iluminación es un haz colimado que procede de un láser ultrarrápido de Titanio-Zafiro de pulsos ultracortos (Mira900f, Coherent, St.Clara CA, EEUU). Éste láser proporciona pulsos de luz infrarroja con una duración de unos 110 femtosegundos y una frecuencia de repetición de 76 MHz. Su potencia media es de 0.8 W y la longitud de onda variable, aunque para en este trabajo se ha utilizado luz de 760 nm.

Como se observa en la Figura 4.7, el haz láser pasa por el sistema de barrido XY formado por dos espejos galvanométricos no resonantes (GSI, VM1000, Billerica, MA, EEUU) que permiten escanear la muestra en dos dimensiones. Tras esto, se refleja en un espejo dicróico (que sirve para separar el haz de excitación de la señal generada por el fenómeno no lineal en la muestra) atraviesa el objetivo del microscopio y focaliza la muestra estudiada. El objetivo del microscopio usado en este trabajo es de 20x (NA= 0.5) con una distancia de trabajo larga (Nikon ELWD Series). Para mantener controlado el barrido a lo largo del eje Z y controlar la posición del foco se utilizó un motor DC (PI C-136, Karlsruhe, Alemania).

La señal no lineal que genera la muestra atraviesa de nuevo el objetivo (*backward direction*) pasa por un filtro espectral de banda ancha (435-700nm) para aislar la señal TPEF, que llega a la unidad de detección formada por un fotomultiplicador combinado con una unidad contadora de fotones. Este microscopio está completamente automatizado y controlado mediante un *software* diseñado en el LO·UM en LabView™.

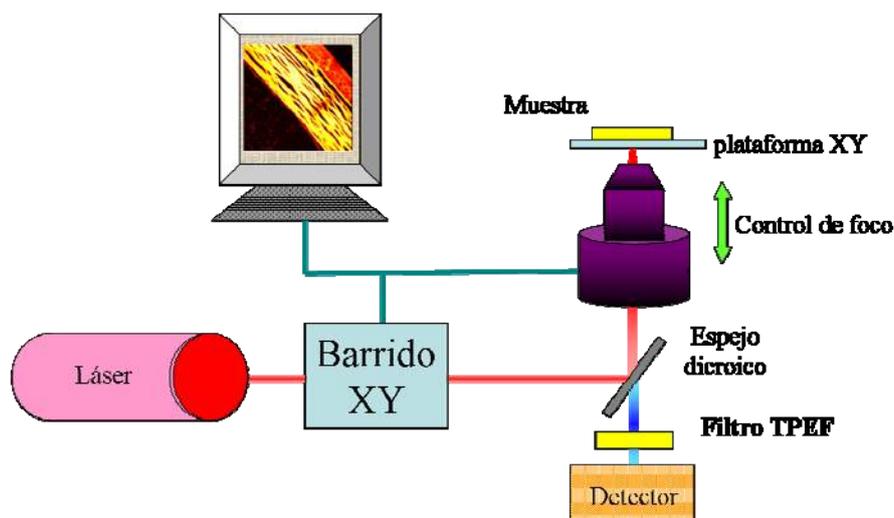


Figura 4.7. Esquema general del microscopio multifotónico.

4.2.2. Muestras

Longitud axial ocular

La longitud axial ocular se midió en los 116 ojos de 58 bovinos de lidia (18 ganaderías diferentes) procedentes de las plazas de toros de Murcia, Abarán y Calasparra. Los animales tenían edades entre 18 y 59 meses (9 añojos, 7 erales, 11 uteros y 31 cuatreños). Los pesos se situaron entre 165 y 596 Kg. Los ojos fueron enucleados *post-mortem* por un veterinario especializado (para minimizar posibles daños) a los 10 minutos aproximadamente de la muerte del animal. Se utilizaron tijeras y pinzas de cirugía para retirar el tejido conectivo y muscular extraocular, evitando realizar presión en el globo ocular para mantener

correctamente todas las estructuras intraoculares. Tras esta operación se les tomó la presión intraocular con un tonómetro.

Los globos se depositaron en contenedores con solución salina y seguidamente se transportaron al LO·UM para el correspondiente experimento. El tiempo entre la enucleación y la medida no excedió de 2 horas. Puesto que en ese tiempo pueden producirse cambios en la presión intraocular que afectan a la medida de la longitud axial, se eliminaron de las medidas todos aquellos ojos cuya tensión intraocular había variado más de 5 mmHg.

Una vez terminado el experimento, las muestras, por ser material específico de riesgo (MER) se trataron como indica la normativa vigente (de forma similar se hizo con las usadas en el siguiente apartado).

Estructura retiniana y localización de células fotorreceptoras

Para los objetivos de este apartado se utilizaron 4 globos oculares de 3 toros de lidia cuatreños pertenecientes a la misma ganadería y lidiados en la plaza de toros de Murcia. El proceso de enucleación y transporte fueron los mismos que se acaban de describir.

En primer lugar se llevó a cabo el registro de imágenes con el sistema comercial OCT antes citado. Tras dicha operación, dos de los globos oculares se enviaron directamente al grupo de Oftalmología Experimental de la Facultad de Medicina para proceder a un montaje global *in toto* a plano de las dos retinas. El protocolo utilizado se describe a continuación. Utilizando un bisturí se realizó una incisión en la zona perilimbar, para asegurar una correcta fijación de las estructuras intraoculares. Los globos oculares se fijaron por inmersión en paraformaldehído al 4%, durante 2 horas a 4°C. A continuación se eliminó el paraformaldehído mediante lavados consecutivos de los ojos en tampón fosfato salino (*Phosphate buffer saline*, PBS 0.1M; pH 7.2-7.4). Se realizó una sección circular a nivel del limbo esclero-corneal y se retiraron la córnea, el iris junto al cuerpo ciliar y el cristalino. La orientación de la retina se estableció tomando como referencia el *tapetum lucidum*, que en el toro de lidia se dispone dorsalmente. Sobre la copa óptica se realizaron cuatro cortes radiales, equidistantes entre sí, orientados hacia nervio óptico y tomando como referencia el polo superior, que se identificó mediante un corte más profundo. De esta manera quedan delimitados cuatro cuadrantes en la retina. A continuación se disecó la retina de coroides y esclera con ayuda de unas pinzas finas y se diseccionó el nervio óptico a nivel de la lámina cribosa con unas tijeras de cirugía. La retina se extendió con la cara vítrea hacia arriba en un portaobjetos, se le adhirió papel de filtro Whatman® número 1 (Whatman International Ltd., Maidstone, Inglaterra) y se post-fijó en paraformaldehído al 4% durante 2 horas a 4°C. Se

retiró el papel de filtro y se hicieron tres lavados consecutivos de 15 minutos en PBS. Se dispuso la retina sobre un portaobjetos y se limpiaron los restos de vítreo con ayuda de unas pinzas finas y un pincel. Finalmente, la retina se montó *in toto* orientando la cara vítrea hacia arriba en el portaobjetos, cubriéndola con medio de montaje acuoso consistente en glicerol en tampón carbonato sódico 0.1 M (pH 9, 3:1) y un cubreobjetos, sellándose con laca de uñas.

Como ejemplo, la Figura 4.8 muestra una fotografía de una retina de toro de lidia fijada y lista para ser analizada con el microscopio multifotónico.

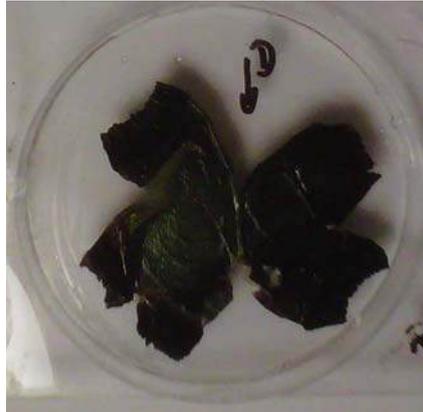


Figura 4.8. Fotografía de una retina de toro fijada. D, zona dorsal.

4.3. Resultados

4.3.1. Longitud axial ocular en el toro de lidia

La Figura 4.9 muestra los resultados de longitud axial en función de la edad para todos los ojos medidos. Cada dato individual corresponde a la media de 6 medidas. Los datos muestran una correlación lineal significativa entre ambos parámetros ($R=0.84$, $p<0.0001$).

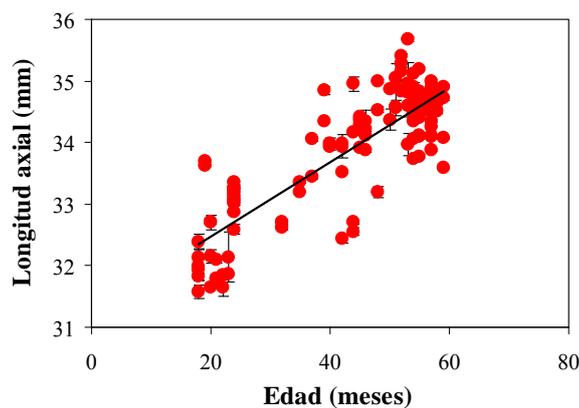


Figura 4.9. Longitud axial en función de la edad del animal para todos los ojos analizados. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($L=0.06*Edad+31.26$).

Debido a la correlación lineal entre la edad y el peso de los animales (véase por ejemplo la Figura 2.16), la relación entre el peso y la longitud axial es también significativa como se

puede observar en la Figura 4.10 ($R=0.81$, $p<0.0001$). El valor medio de la longitud axial para todos los animales es de 33.90 ± 1.02 mm, con un valor mínimo de 31.58 mm y un máximo de 35.68 mm.

De forma similar a lo hecho en el Capítulo 2 y para una mejor interpretación, la Figura 4.11 agrupa los animales por grupos de edad. En esta gráfica se puede apreciar claramente la progresión con la edad. En media hay un aumento de un 7% entre cuatreños y añojos.

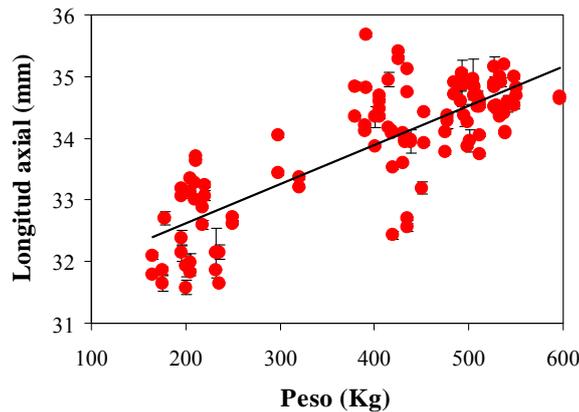


Figura 4.10. Relación lineal significativa entre el peso del animal y la longitud axial ocular ($L=0.006*\text{Peso}+31.35$) para todos los ojos involucrados en el presente estudio.

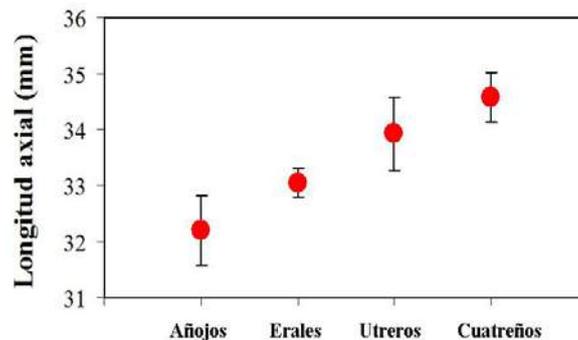


Figura 4.11. Valores medios de la longitud axial para distintos grupos de edad. Las barras de error indican la desviación estándar de cada grupo.

Al igual que se hizo con el ERO en el capítulo anterior, aquí también se ha analizado la simetría entre el OD y el OS. La Figura 4.12 compara los valores de longitud axial entre ambos ojos. Los datos muestran una correlación lineal significativa ($R=0.83$, $p<0.0001$).

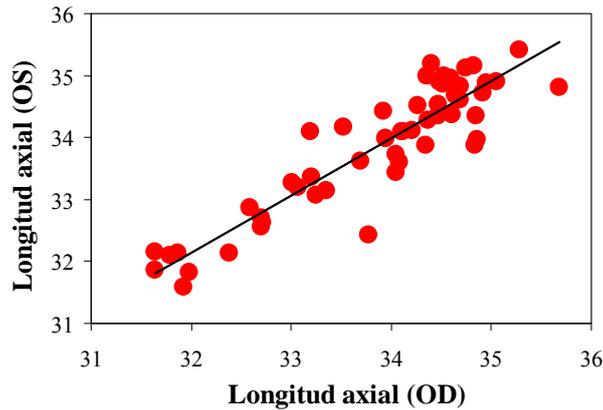


Figura 4.12. Comparación de las longitudes axiales entre el OD y el OS en los 58 animales. La línea continua representa el mejor ajuste lineal ($L_{OS}=0.92*L_{OD}+2.60$).

4.3.2. Imágenes OCT de la retina del toro de lidia

Como ejemplo de la potencialidad del sistema OCT utilizado, la Figura 4.13 muestra imágenes de dos zonas de la retina correspondientes a dos ojos diferentes registradas con la cámara de fondo que lleva incorporada el instrumento. El *software* proporcionado por el fabricante permite cambiar el contraste de la zona marcada para una mejor observación de las estructuras retinianas. En este caso se pueden observar claramente las diferencias en el tamaño de los capilares que surcan la retina dependiendo de la zona de registro de la imagen.

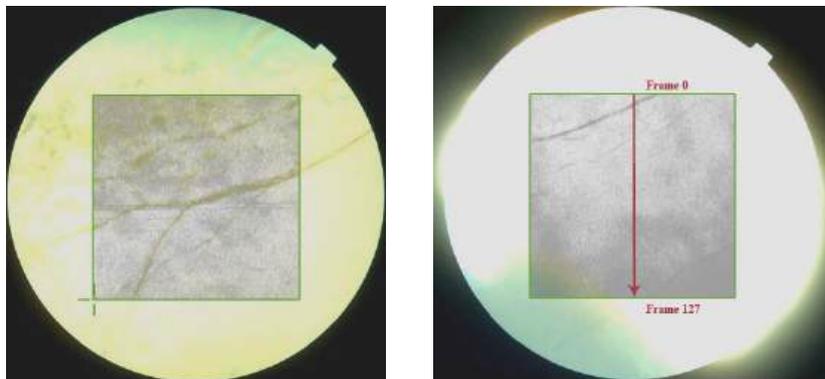


Figura 4.13. Imágenes del fondo retiniano de dos ojos de toro de lidia diferentes.

En la Figura 4.14 se muestra la papila o cabeza del nervio óptico de ambos ojos del mismo animal. Se puede apreciar tanto la posición nasal de dicha estructura como el patrón holangiótico de los vasos sanguíneos ya descrito en el Capítulo 1.

Una vez localizada la cabeza del nervio óptico y la zona que contiene el *horizontal visual streak* se procedió a tomar imágenes OCT tipo B-Scan. La visualización de las imágenes del fondo de ojo y las OCT son simultáneas. Tal es así, que los cuadrados verdes marcados en las figuras anteriores corresponden a zonas donde se registran los B-Scans de la OCT, que van

numerados en sentido creciente desde arriba (línea superior, *frame* #0) hasta abajo (línea inferior, *frame* #127) como se indica en la Figura 4.13.

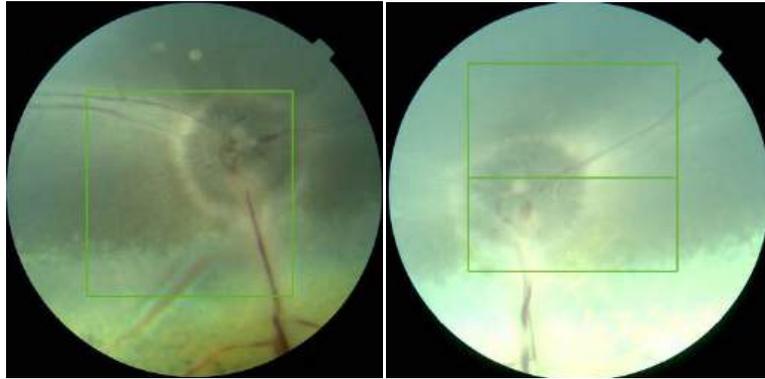


Figura 4.14. Papila del OD (izquierda) y OS (derecha) del mismo animal.

Como primer ejemplo, meramente ilustrativo, la Figura 4.15 presenta la imagen OCT de la cabeza del nervio óptico de uno de los ojos analizados. La localización corresponde a la línea central de la imagen de la derecha de la Figura 4.14 (*frame* #70). En la parte inferior izquierda de la imagen se puede apreciar la excavación típica del nervio óptico. En la parte derecha se pueden observar diferentes capas de estructuras retinianas.

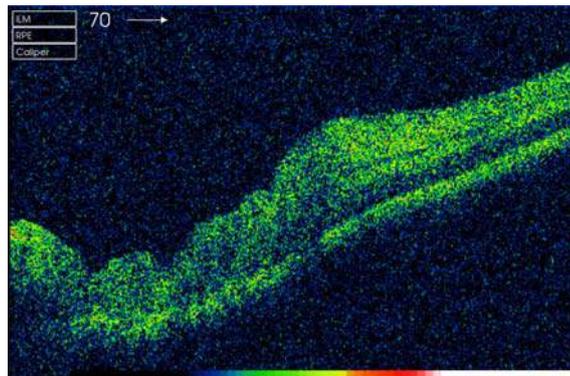


Figura 4.15. Imagen OCT (*frame* #70) de la papila de un ojo de toro de lidia.

Sin embargo, en el presente estudio quizás la zona más interesante para el análisis de imágenes OCT es la que corresponde a la zona central del *visual streak*. En particular, la Figura 4.16 muestra la imagen OCT de la parte superior (*frame* #0). Se puede apreciar cómo la retina está dividida claramente en dos partes: la interna (superior en la figura) y la externa (inferior en la figura). En la primera de ellas la señal más intensa (roja) corresponde a los axones de las células ganglionares. Por otra parte, la señal que viene de la parte inferior corresponde a los fotorreceptores (nominalmente los segmentos externos).

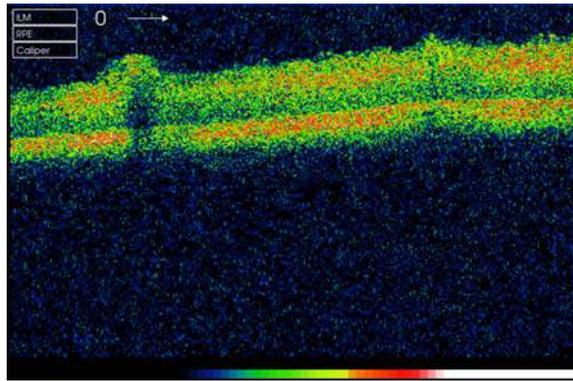


Figura 4.16. Imagen OCT (*frame #0*) de la zona superior del *horizontal visual streak* de la retina de un toro de lidia.

A diferencia de la parte superior del *visual streak*, la parte inferior (*frame #127*) muestra a simple vista mucha menos reflectividad en conjunto (Figura 4.17). Puesto que en las imágenes OCT la reflectividad va ligada a la densidad de células, el cambio observado podría estar asociado a una reducción tanto en el número de células ganglionares como en el de fotorreceptores. En la Figura 4.18 se muestra este hecho de forma cuantitativa. Se han representado los perfiles promediados de intensidad de las imágenes OCT mostradas. De la parte superior a la inferior a reducción es de un 41%.

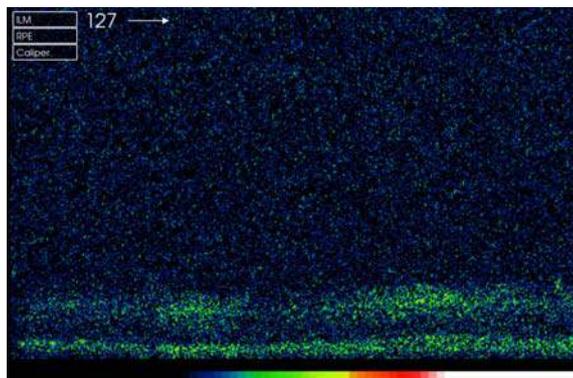


Figura 4.17. Imagen OCT (*frame #127*) de la zona inferior del *horizontal visual streak* de la retina de un toro de lidia.

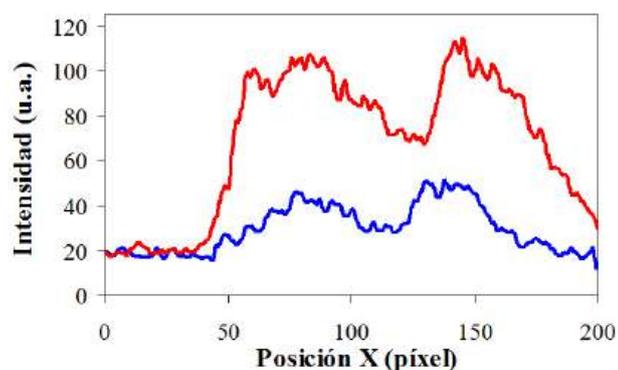


Figura 4.18. Perfiles de intensidad media correspondientes a las imágenes OCT de las Figuras 4.16 y 4.17.

Para una mejor visualización del cambio en reflectancia con la posición retiniana, la Figura 4.19 muestra la intensidad total del perfil para cada posición, desde la parte superior hasta la inferior (es decir, del *frame* #0 hasta el #127).

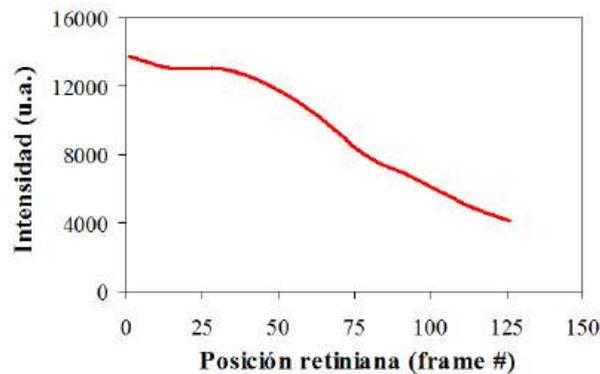


Figura 4.19. Intensidad total de cada imagen OCT en función de la posición retiniana (el *frame* #0 y el #127 son el superior y el inferior tal cual se indica en la Figura 4.13).

4.3.3. Imágenes multifotónicas de células retinianas en el toro de lidia

La Figura 4.20 muestra una imagen de microscopía multifotónica de la zona central de la retina del toro de lidia no teñida. Se puede apreciar claramente las estrías alargadas en la dirección horizontal que forman el *visual streak* típico de la retina de los bovinos (véase apartado 1.1.5).

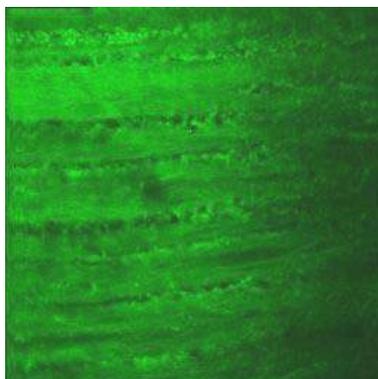


Figura 4.20. Imagen multifotónica del *horizontal visual streak* de la retina del toro de lidia. La imagen tiene un tamaño de $270 \times 270 \mu\text{m}^2$.

Se ha de tener en cuenta que a pesar de que la muestra no está teñida, y por tanto toda la señal corresponde a fluorescencia endógena TPEF, en la Figura 4.20 se pueden observar algunas células ganglionares. Una imagen registrada con mayor aumento donde distinguen estas células de forma individual se presenta en la Figura 4.21.

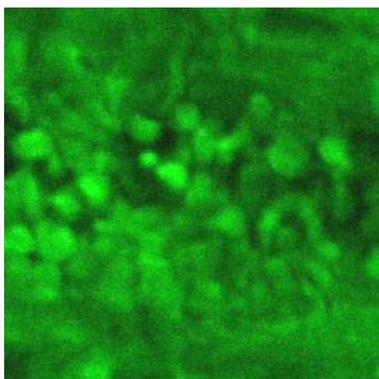


Figura 4.21. Células ganglionares de la retina del toro de lidia visualizadas con microscopía multifotónica. La imagen tiene un tamaño de $45 \times 45 \mu\text{m}^2$.

Debido a las propiedades de auto-confocalidad de la microscopía multifotónica se pueden registrar imágenes de diferentes capas de la retina, en concreto desde la más interna que correspondería a la capa de fibras nerviosas hasta la más externa que serían los fotorreceptores (segmentos externos). En particular, y a título demostrativo, la Figura 4.22 muestra el mosaico de fotorreceptores en una de las retinas de toro de lidia analizadas. Los puntos brillantes más pequeños corresponden a bastones y los negros más grandes a conos.

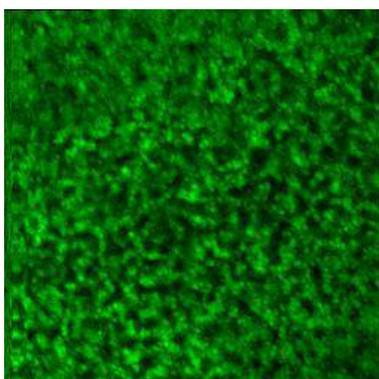


Figura 4.22. Imagen de microscopía multifotónica que muestra el mosaico de células fotorreceptoras de la retina del toro de lidia. La imagen tiene un tamaño de $90 \times 90 \mu\text{m}^2$

Los puntos nodales de un sistema óptico son aquellos dos puntos situados sobre el eje óptico que verifican que si un rayo incide sobre el punto nodal objeto (N) con un ángulo determinado, emergerá por el punto nodal imagen (N') con el mismo ángulo. Así, conocida la inter-distancia entre pares de células se puede calcular lo que subtenden los detalles que irían a parar sobre dichas células.

Conocidas las dimensiones de la imagen y el número de píxeles que la forman, sobre la imagen de las células ganglionares se puede calcular la inter-distancia media (D_{CG}) directamente a partir del espectro de Fourier de la imagen [Bueno et al., 2011]. En particular, para las imágenes registradas en este trabajo en la zona central de dos retinas de toro de lidia, se ha obtenido un valor medio de D_{CG} de $8.15 \mu\text{m}$.

Por otra parte, a partir de un modelo de ojo de bovino [Coile and O'Keefe, 1988] se ha determinado la posición de N' y su distancia a la retina, denominada distancia nodal posterior (DNP). Aunque el modelo supone un ojo emétrepe y una córnea esférica, se puede dar por válido en una primera aproximación. Así, la resolución visual espacial anatómica (VR, del inglés *Visual Resolution*) en ciclos/grado se puede calcular como [Pettigrew et al., 2010]:

$$VR = \frac{\pi}{180} \cdot \frac{DNP}{2 \cdot D_{CG}}$$

El valor medio de VR obtenido ha sido de 6 ciclos/grado. Teniendo en cuenta que 30 ciclos/grado corresponde a una AV=1 [Bennet and Rabbetts, 2004], el valor medio de la AV anatómica en la zona central de la retina del toro de lidia se podría estimar en 0.2.

4.4. Discusión

4.4.1. Longitud ocular axial en el toro de lidia

Se ha utilizado la interferometría de coherencia espacial como herramienta para medir la longitud axial del ojo del toro de lidia. Este parámetro ocular se ha medido en multitud de animales pero no se han encontrado datos en la literatura sobre el toro de lidia, aunque sí en distintos tipos de bovinos. Sin embargo, las comparaciones directas entre los resultados aquí obtenidos y los encontrados en la literatura son difíciles porque las razas analizadas son diferentes y en muchos de los casos ni siquiera los autores aportan información sobre la edad de los animales.

A pesar de todo, en términos generales el rango de longitudes axiales aquí expuestas es coherente con lo encontrado previamente por otros autores. En particular, sirva como ejemplo que para toros cuatreños (54 meses de edad media) se ha obtenido un valor medio de 34.58 mm, similar a los 34.6 mm encontrados en animales de la raza Holstein o Frisona con 61 meses [Potter et al., 2008], pero claramente mayor que los 32.7 mm para raza Jersey (74 meses) o 32.9 mm en búfalos (50 meses) [Potter et al., 2008; Assadnassab and Fartashvand, 2013]. Por su parte, Howland y colaboradores encontraron valores entre 28 y 37 mm para diferentes especies de bovino sin especificar la edad [Howland et al., 2004].

Un aspecto esencial añadido en este trabajo es el estudio de dicho parámetro y su cambio con la edad del animal (o alternativamente, con el peso). Diversos autores han mostrado que existe una relación directa creciente entre la edad de los animales y la longitud axial. Este hecho se ha confirmado en perros [Paunksnis et al., 2014; Tuntivanich et al., 2007], caballos

[Rogers et al., 1986; Saroori et al., 2009], dromedarios [El-Tookhy et al., 2012; Kassab, 2012], búfalos [Assadnassab and Fartashvand, 2013; Kassab, 2012], elefantes [Bapodra et al., 2010], cabras [El-Tookhy and Tharwat, 2013] y ovejas [Mohammadi et al., 2011; El-Tookhy and Tharwat, 2013]. Aquí se ha encontrado una relación lineal creciente y significativa entre la edad del animal y la longitud axial ocular:

$$\text{Longitud axial(mm)} = 0.06 \cdot \text{Edad(meses)} + 31.26$$

Además, la comparación entre pares de ojos de un mismo animal indica que no hay diferencias significativas entre la longitud axial del OD y del OS. Esto es coherente con las medidas de la refracción presentadas en el Capítulo 3, donde tampoco se encontraron diferencias estadísticamente significativas.

Puesto que la longitud axial es uno de los aspectos fundamentales en el ERO se podría pensar que éste cambia también con la edad. Sin embargo la longitud axial habría que combinarla con los posibles cambios en la curvatura de la primera cara de la córnea y por tanto el posible cambio no es tan directo de explorar. Aunque no se pueden relacionar de forma directa los ojos medidos en este apartado con la refracción correspondiente de cada uno, sí se pueden discutir en términos generales qué factores harían que el ERO evolucionara en una dirección determinada.

Tal es así que si la córnea permaneciera constante con la edad (es decir, sin cambios en el radio de curvatura), un aumento en la longitud axial indicaría una progresión del ERO hacia la miopía. Sin embargo, teniendo en cuenta los resultados del Capítulo 3, éstos indican lo contrario: el toro adulto es más hipermetrope que los becerros. Este hecho implicaría que, sin tener en cuenta los efectos del cristalino, con la edad produce un aplanamiento de la córnea (reducción de su radio de curvatura) cuyo efecto “es mayor” que el correspondiente aumento de la longitud axial. Dicho de otra forma, la córnea se volvería más plana con la edad para que el ojo se haga más hipermetrope. Este cambio corneal tiene un efecto óptico mayor que el aumento de longitud axial, no sólo para compensar la miopía axial que se genera sino para generar hipermetropía. En este sentido, futuros experimentos que involucren medidas de curvatura corneal utilizando un topógrafo ayudarían a completar la caracterización del ojo del toro de lidia y a confirmar con datos fehacientes lo que se acaba de discutir.

Por otra parte, hay autores que han relacionado la longitud axial ocular con el tamaño del cuerpo en diversos animales vertebrados [Howland et al., 2004], o el peso con el tamaño de cierto órganos [Schmidt-Nielsen, 1984]. En ese sentido, se podría calcular el denominado exponente de masa corporal, M, que cumple esta relación:

$$\text{Tamaño Órgano} = K \cdot \text{Peso}^M$$

En nuestro caso se ha obtenido $M=0.0647$ ($R^2=0.6747$). Ese dato es menor que el de 0.225 ($R^2=0.835$) reportado en un estudio que involucró 145 especies de mamíferos diferentes [Howland et al., 2004]. La diferencia puede deberse a la variabilidad en el peso entre los mamíferos involucrados en el estudio, mucho mayor que la usada aquí (431 kg entre el añojo más pequeño y el más pesado de los toros cuatroños). Aunque la ecuación se ha usado para la longitud axial, podría ser aplicada a cualquier otro órgano del toro de lidia, lo cual sería interesante para confirmar su validez en este tipo de animales.

4.4.2. Estructura retiniana y células fotorreceptoras

Debido a la importancia de la distribución y densidad de células fotorreceptoras, éstas han sido analizadas en detalle en el ojo humano durante muchos años [Curcio et al., 1990]. Otros modelos animales como ratas [Araki et al., 1987] o pollos [Bueno et al, 2011] han sido también objeto de estudio usando diversas técnicas.

Los estudios sobre la distribución de células retinianas en la retina del bovino no son numerosos y todos ellos se centran en el análisis de las células ganglionares en la zona del *visual streak* [Hebel, 1976; Hebel and Holländer, 1979; Heffner and Heffner, 1992]. Los resultados se ciñen a la distribución en la dirección horizontal (desde la zona nasal a la temporal) pero no se han encontrado datos que muestren lo que pasa cuando se comparan zonas superiores e inferiores de ese *visual streak*.

En este Capítulo 4 se ha analizado la retina del toro de lidia utilizando imágenes OCT y microscopía multifotónica. Con las imágenes OCT no se pueden calcular densidades, sino solamente “inferirlas” a partir de los datos de reflectividad de las diferentes zonas. Sin embargo se ha mostrado que la reflectividad tanto de la capa de células ganglionares como de los fotorreceptores va disminuyendo de la parte superior a la inferior. Esto indicaría a su vez que la densidad de células retinianas también disminuye progresivamente hacia abajo.

Desde el punto de vista funcional esta distribución sería coherente porque la mayor parte de las actividades del ganado bovino se centran en zonas que ocupan el campo visual vertical, que se extiende desde la línea horizontal de mirada en posición de reposo, hacia abajo. Puesto que el ojo se invierte las localizaciones, a esta zona le corresponde una formación de imagen sobre la zona superior del *visual streak*. Teniendo en cuenta que es esa la zona del espacio donde se localiza normalmente la comida, es “razonable” que la calidad de visión en términos generales ha de ser mejor, lo cual iría íntimamente ligado a una mayor densidad de células fotorreceptoras retinianas.

Por otra parte, la zona del espacio que corresponde a localizaciones retinianas con menor densidad de células es aquella situada de la línea horizontal de mirada en posición de reposo hacia arriba. Ese espacio es de menos interés para el bovino, por lo que es posible que la propia naturaleza haya hecho que la funcionalidad de esa parte de la retina sea menor.

Como ya se ha comentado en el Capítulo 1, se estima que el campo visual vertical en el bovino es de unos 60° y que el ojo del bovino está diseñado “para mirar hacia abajo”. Esto queda confirmado con los resultados aquí expuestos, aunque con este tipo de imágenes OCT no se puede hacer una comparación cuantitativa. Es decir, nuestros resultados nos dan una idea general de la distribución de una forma más cualitativa que cuantitativa. Medidas futuras podrán aportar información cuantitativa precisa que dará cuerpo a un estudio exhaustivo del campo visual en la dirección vertical.

Particularizando para el toro de lidia, los datos son igual de escasos. En la literatura a la que se ha tenido acceso, se han encontrado dos alusiones al campo vertical que se muestran en la Figura 4.23, pero en ambos casos se desconoce la forma en la que éste fue calculado.

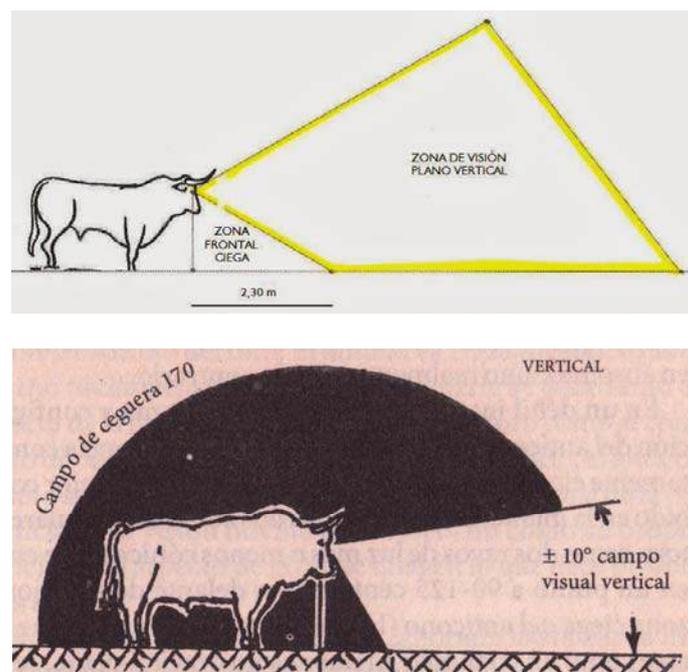


Figura 4.23. Campo visual en el toro de lidia en la dirección vertical [Martín Roldán, 1965; Johnston 2000].

Como mera curiosidad se puede aludir a la experiencia con estos animales cuando se les muestra algún estímulo (novedoso) por encima de su eje horizontal de mirada en reposo. En esos casos siempre tienden a girar la cabeza hacia arriba, posiblemente para llevar la imagen de dicho estímulo a una “mejor zona” de la retina (Figura 4.24).



Figura 4.24. Posición de la cabeza del toro de lidia cuando se le estimula desde la parte superior.

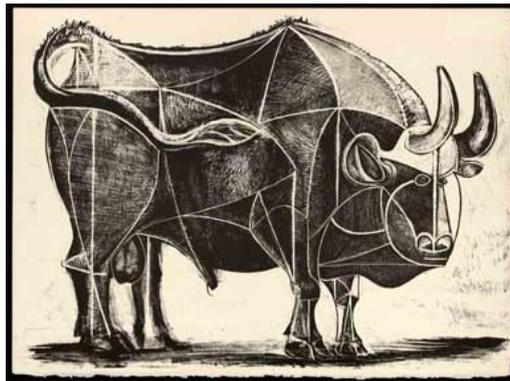
Por otra parte se han hecho imágenes de microscopía multifotónica de la retina del toro de lidia. Debido a la alta resolución que proporciona esta técnica se ha centrado la atención en las imágenes de células ganglionares individuales de la zona más central de la retina. Las células se pueden observar claramente en las imágenes.

A partir de dichas células se ha calculado la resolución visual anatómica media correspondiente a esa zona de la retina y se ha estimado que es de aproximadamente 6 ciclos/grado, lo que corresponde a una AV de 0.2. Para hacerse una idea, este valor es equivalente a ver dos detalles separados 8.75 mm a 6 m de distancia (un ser humano en condiciones normales los vería separados a 1.75 mm, es decir 5 veces más juntos, $AV=1$).

Hay que tener en cuenta que esta AV es puramente anatómica y que puede estar influenciada tanto por la óptica ocular como por la parte neuronal del sistema visual. Es obvio que si el ojo del toro de lidia es amétrope (como se ha mostrado en el Capítulo 3) la AV efectiva será obviamente menor.

De los estudios encontrados sobre AV en bovinos, algunos se realizaron con pruebas funcionales [Entsu et al., 1992; Rehkämper and Görlach, 1998; Rehkämper et al., 2000] y otros a partir de la densidad de células ganglionares [Heffner and Heffner, 1992]. Los valores son muy dispares y van desde un mínimo de 0.027 en los primeros hasta los 0.41 obtenidos con las medidas fisiológicas (aunque no indican qué zona de la retina utilizaron). El valor obtenido en el presente trabajo se sitúa entre ambos.

Conclusiones



CAPÍTULO 5

Conclusiones

Los principales objetivos de esta Tesis Doctoral han estado enfocados a explorar la parte óptica del sistema visual del toro de lidia. Por un lado, se han analizado las dimensiones del campo visual horizontal y por otro se ha estudiado los defectos refractivos. Además se han evaluado varios parámetros anatómicos que permiten mejorar el conocimiento de las estructuras oculares. Todo esto está basado en el hecho de que hasta la fecha no existen trabajos que utilicen métodos científicos rigurosos para este tipo de estudios.

Puesto que la visión en el toro bravo es fundamental para un comportamiento correcto durante su lidia, los resultados aquí expuestos podrían ser de primordial importancia para el desarrollo de la faena por parte de torero, ayudando a mejorar su lucimiento y el resultado estético, y sobre todo para evitar posibles accidentes o percances durante la misma.

En este sentido, a continuación, se enumeran las principales aportaciones y conclusiones de este trabajo:

1. Se ha realizado un análisis cuantitativo del campo visual horizontal en el toro de lidia, obteniéndose un valor medio de 30° para el campo binocular y una zona ciega posterior de 68°. Dichos valores no cambian con la edad.
2. Los ejes visuales forman un ángulo de 140°, en media, que también se mantiene constante con la edad.
3. La longitud de la zona de exclusión visual muestra un aumento sustancial con la edad (de 28 cm en añojos a 39 cm en cuatreños).
4. Se ha analizado el ERO con un retinoscopio. A lo largo del meridiano horizontal el toro en condiciones *post-mortem* muestra hipermetropía ($+0.66 \pm 0.85$ D en media). Para

animales con edades similares los valores del ERO medidas *post-mortem* y en vivo no mostraron diferencia significativas.

5. El toro de lidia presenta valores de refracción similares al bovino manso, aunque la variabilidad fue mayor en los primeros (entre -1.0 y +2.5 D en los toros y entre -0.5 y +1.5 D en los mansos).

6. Se ha encontrado que el toro de lidia se hace más hipermetrope con la edad (35% de aumento entre becerros y cuatrefños).

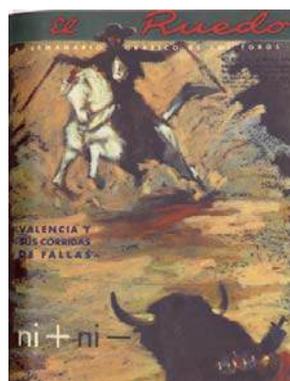
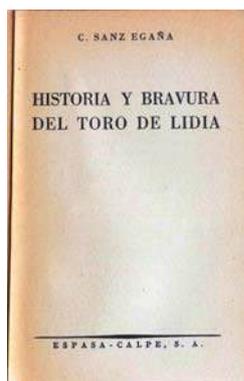
7. Se ha determinado la ametropía a lo largo del meridiano vertical, resultando ser “menos hipermetrope” que el horizontal, lo que indica que el ojo del toro de lidia presenta astigmatismo ($+0.73 \pm 0.30$ D en media).

8. Utilizando una técnica de interferometría de coherencia parcial se ha estudiado la longitud axial ocular en función de la edad, encontrándose una relación lineal creciente y significativa entre ambos parámetros (aumento medio de un 7% entre becerros y añojos).

9. El análisis de la retina del toro de lidia con imágenes OCT ha mostrado que la densidad de células retinianas disminuye progresivamente hacia la zona inferior del *horizontal visual streak*, lo cual resulta coherente con la actividad diaria de este tipo de ganado bovino.

10. Se ha analizado la parte más central de la retina del toro de lidia utilizando microscopía multifotónica. La visualización de las células ganglionares individuales ha permitido fijar en 0.2 el valor medio puramente anatómico de AV en esa zona de la retina del toro de lidia.

Bibliografía



Ademwada A and Natrajan S. "Ocular biometry and intraocular lens power calculations in microphaco," in: *Garg's Mastering the Art of Bimanual Microincision Phaco*, Jaypee Brothers Medical Publishers, Nueva Delhi (2005).

Altman PL and Dittmer DS. "Growth, including reproduction and morphological development," *Federation of American Societies for Experimental Biology*, Washington DC (1962).

Aly K. *Glycohistochemical, immunohistochemical and electron microscopic examination of the bovine eyeball*, Tesis Doctoral, Ludwig-Maximilians-Universität, München (2003).

Aly KH and Hifny A. "Morphometric analysis of the refractive media in some domestic animals," *Eur. J. Vet. Med.* **2**(1), 11-28 (2013).

Anasagasti V de. *Los Ojos del Toro*, Librería Alejandro Pueyo (1922).

Andrew RJ and Rogers LJ. *Comparative Vertebrate Laterization*, Cambridge University Press, Cambridge (2002).

Araki M, Iida Y, Taketani S, Watanabe K, Ohta T and Saito T. "Characterization of photoreceptor cell differentiation in the rat retinal cell culture," *Develop. Biol.* **124**(1), 239-247 (1987).

Ashby RS and Schaeffel F. "The effect of bright light on lens compensation in chicks," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **51**(10), 5247-5253 (2010).

Assadnassab G and Fartashvand M. "Ultrasonography of vitreous chamber in Iranian Holstein cattle," *Adv. Environ. Biol.* **5**(7), 1854-1856 (2011).

Assadnassab G and Fartashvand M. "Ultrasonographic evaluation of buffalo eyes," *Turkish J. Vet. Anim. Sci.* **37**(4), 395-398 (2013).

Atchison DA and Smith G. *Optics of the Human Eye*, Butterworth-Heinemann, Oxford, (2000).

Atchison DA. "Accommodation and presbyopia," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **15**(4), 255-272 (1995).

Balci Y, Basmak H, Kocaturk BK, Sahin A and Ozdamar K. "The importance of measuring intraocular pressure using a tonometer in order to estimate the postmortem interval," *Am. J. Forensic Med. Pathol.* **31**(2), 151-155 (2010).

Baldwin BA. "Shape discrimination in sheep and calves," *Anim. Behav.* **29**(3), 830-834 (1981).

Bamber JC and Trstam M. "Diagnostic ultrasound," *Webb's Physics of Medical imaging*, 319-388 (1988).

Banks WJ. *Applied Veterinary Histology*, 3rd ed., Mosby Year Book, St. Louis (1993).

- Bapodra P, Bouts T, Mahoney P, Turner S, Silva-Fletcher A and Waters M. "Ultrasonographic anatomy of the Asian Elephant (*Elephas maximus*) eye," *J. Zoo Wildlife Med.* **41**(3), 409-417 (2010).
- Belkin M, Yinon U, Rose L and Reisert I. "Effect of visual environment on refractive error of cats," *Doc. Ophthalmol.* **42**(2), 433-437 (1977).
- Benavente-Pérez A, Nour A and Troilo D. "The effect of simultaneous negative and positive defocus on eye growth and development of refractive state in marmosets," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **53**(10), 6479-6487 (2012).
- Bennett AG and Rabbetts, RB. *Clinical Visual Optics*, 3th ed., Butterman-Heinemann, New York (2004).
- Bettelheim FA. "Syneretic response to pressure in ocular lens," *J. Theor. Biol.* **197**, 277-280 (1999).
- Bloom W and Fawcett DW. "The Eye," in: *A Textbook of Histology*, 9th ed., W.B. Saunders Company, Philadelphia (1970).
- Boucher F, Leblanc RM, Savage S and Beaulieu B. "Depth-resolved chromophore analysis of bovine retina and pigment epithelium by photoacoustic spectroscopy," *Appl. Opt.* **25**(4), 515-520 (1986).
- Bradley DV, Fernandes A, Lynn M, Tigges M and Boothe RG. "Emmetropization in the rhesus monkey (*Macaca mulatta*): birth to young adulthood," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **40**(1), 214-229 (1999).
- Bridges CD, "Lectin receptors of rods and cones. Visualization by fluorescent label," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **20**(1), 8-16 (1981).
- Brooke MDL, Hanley S and Laughlin SB. "The scaling of eye size with body mass in birds," *Proc. Royal Soc. London. Series B: Biol. Sci.* **266**(1417), 405-412 (1999).
- Bueno JM, Giakoumaki A, Gualda EJ, Schaeffel F and Artal P. "Analysis of the chicken retina with an adaptive optics multiphoton microscope," *Biomed. Opt. Express* **2**(6), 1637-1648 (2011).
- Bueno JM, Gualda EJ and Artal P. "Adaptive optics multiphoton microscopy to study ex-vivo ocular tissues," *J. Biom. Opt.* **15**(6), 066004 (2010).
- Bühren J, Kohnen T and MacRae SM. "How should we manipulate higher-order aberrations after refractive surgery," in: *Cataract and Refractive Surgery: Progress III*, Kohnen T and Koch DD eds., Springer-Verlag, Heidelberg (2009).
- Ciuffreda KJ, Levi DM and Selenow A. *Amblyopia: Basic and Clinical Aspects*. Butterworth-Heinemann (1991).
- Clement RA. "A quantitative description of lens eye morphology and its implications," *Ophthal. Physiol. Opt.* **24**(3), 242-245 (2004).

- Cohen AI. "Rods and cones and the problem of visual excitation," in: *The Retina - Morphology, Function and Clinical Characteristics*, Straatsma BR, Hall MO and Allen RA eds., University of California, Los Angeles (1969).
- Coile DC and O'Keefe LP. "Schematic eyes for domestic animals," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **8**(2), 215-220 (1988).
- Corboy JM. *The Retinoscopy Book: An Introductory Manual for Eye Care Professionals*, 5th ed., SLACK Incorporated, London (2003).
- Cossío JM de. *Los Toros. Tratado Técnico e Histórico*. Volumen I, 7ª ed., Espasa Calpe. SA (1974).
- Cruz J. *El Toro de Lidia en la Biología, en la Zootecnia y en la Cultura*, Junta de Castilla León, Consejería de Agricultura y Ganadería, Valladolid (1991)
- Curcio CA, Sloan KR, Kalina RE and Hendrickson AE. "Human photoreceptor topography," *J. Comp. Neurol.* **292**(4), 497-523 (1990).
- Daulouede P. *Mundillo ou la corrida à l'envers II*, Fiesta Press (1995).
- De Schaepdrijver L, Simoens P, Lauwers H and De Geest JP. "Retinal vascular patterns in domestic animals," *Res. Vet. Sci.* **47**(1), 34-42 (1989).
- Dellmann, H and Brown EM. "Eye and Ear," in: *Textbook of Veterinary Histology*, Lea & Febiger, Philadelphia (1976).
- Denk W, Strickler JH and Webb WW, "Two-photon laser scanning fluorescence microscopy," *Science* **248**(4951), 73-76 (1990).
- Dimberton A. *La sécurité de l'éleveur et le bien-être des bovins pendant la contention : étude des méthodes adaptées au comportement animal*, Tesis Doctoral, École Nationale Vétérinaire - Lyon 1 (1999).
- Doughty MJ, Petrou S and Macmillan H. "Anatomy and morphology of the cornea of bovine eyes from a slaughterhouse," *Can. J. Zool.* **73**(11), 2159-2165 (1995).
- Drexler W. "Ultrahigh-resolution optical coherence tomography," *J. Biomed. Opt.* **9**(1), 47-74 (2004).
- Duane A. "Normal values of accommodation at all ages," *J. Am. Med. Assoc.* **59**, 1010-1013 (1912).
- Duke-Elder S. "The Eye in Evolution," in: *System of Ophthalmology*, Kimpton (1958).
- Dyce KM, Sack WO and Wensing CJG. "The Sense Organs," in: *Textbook of Veterinary Anatomy*, W. B. Saunders Company, Philadelphia (1987).

- Elliot DB. *Clinical Procedures in Primary Eye Care*, 3rd ed., Butterman-Heinemann, Edinburg (2003).
- El-Maghraby H, Nyland TG and Bellhorn RW. “Ultrasonographic and biometric evaluation of sheep and cattle eyes,” *Vet. Radiol. Ultrasound*. **36**(2), 148-151 (1995).
- El-Tookhy O and Tharwat M. “Clinical and ultrasonographic findings of some ocular conditions in sheep and goats,” *Open Vet. J.* **3**(1), 11-16 (2013).
- El-Tookhy O, Al-Sobayil FA and Ahmed AF. “Normal ocular ecobiometry of the dromedary camels,” *J. Camel Pract. Res.* **19**(1), 13-17 (2012).
- Entsu S, Dohi H and Yamada A. “Visual acuity of cattle determined by the method of discrimination learning,” *Appl. Animal Behav. Sci.* **34**(1), 1-10 (1992).
- Fath El-Bab M, Misk N, Hifny A and Kassem A. “Surgical anatomy of the lens in different domestic animals,” *Anat. Histol. Embryol.* **11**(1), 27-31 (1982).
- Feldkämper M and Schaeffel, F. “Interactions of genes and environment in myopia,” *Dev. Ophthalmol.* **37**, 34-49 (2003).
- Fercher AF, Drexler W, Hitzenberger CK and Lasser T. “Optical coherence tomography-principles and applications,” *Rep. Prog. Phys.* **66**, 239-303 (2003).
- Fercher AF, Mengedoht K and Werner W. “Eye length measurement by interferometry with partially coherent light,” *Opt. Lett.* **13**(3), 186-188 (1988).
- Ferret MLD. *Bases anatómicas y fisiológicas de la selección y del comportamiento del toro de combate*, Tesis Doctoral, Université Paris - Est (2005).
- Findl O, Kriechbaum K, Sacu S, Kiss B, Polak K, Nepp J, Schild G, Rainer G, Maca S, Petternel V, Lackner B and Drexler W. “Influence of operator experience on the performance of ultrasound biometry compared to optical biometry before cataract surgery,” *J. Cataract Refract. Surg.* **29**(10), 1950-1955 (2003).
- Freeman MH. “Ultrasonic pulse-echo techniques in ophthalmic examination and diagnosis,” *Ultrasonics*. **1**(3), 152-159 (1963).
- Furlan WD, García Monreal J y Muñoz Escrivá L. *Fundamentos de Optometría*, 2ª ed., Universitat de València (2011).
- García de la Cera E, Rodríguez G, Llorente L, Schaeffel F and Marcos S. “Optical aberrations in the mouse eye,” *Vision Res.* **46**(16), 2546–2553 (2006).
- García Dory MA, Martínez S y Orozco F. *Guía de Campo de las Razas Autóctonas de España*, Alianza. Madrid (1990).
- García Martínez D. *Diversidad Genética y Establecimiento de Prioridades en Esquemas de Conservación. Ejemplo de Aplicación en la Raza de Lidia*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid (2008).

Gelatt KN, Gilger BC and Kern TJ. *Veterinary Ophthalmology*, 5th ed., Wiley-Blackwell, New York (2013).

Gerometta R, Zamudio AC, Escobar DP and Candia OA. "Volume change of the ocular lens during accommodation," *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* **293**(2), 797-804 (2007).

Getty R, Sisson S and Grossman JD. *The Anatomy of Domestic Animals*, Vol. 1, 5th ed., W.B. Saunders Company, Philadelphia, PA (1998).

Glasser A and Kaufman PL. "Accommodation and presbyopia," in: *Adler's Physiology of the Eye*, 10th ed., Kaufman PL and Alm A eds., Mosby, St Louis (2003).

Goeppert-Mayer M. "Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen," *Ann. Phys.* **9**, 273-295 (1931).

Guigui LS. "Particularités de l'oeil et de la vision du taureau de combat. Intérêt lors du combat," Thèse Méd. Vet., Toulouse (1989).

Hamidzada WA and Osuobeni EP. "Ultrasound velocity in the aqueous and vitreous humours of the one-humped camel (*Camelus Dromedarius*)," *Clin. Exp. Optom.* **81**(5), 222-227 (1998).

Hanke FD, Dehnhardt G, Schaeffel F and Hanke W. "Corneal topography, refractive state, and accommodation in harbor seals (*Phoca vitulina*)," *Vision Res.* **46**(6-7), 837-847 (2006).

Hayashi S, Osawa T, and Tohyama K. "Comparative observations on corneas, with special reference to Bowman's layer and Descemet's membrane in mammals and amphibians," *J. Morphol.* **254**(3), 247-258 (2002).

Hebel R. "Distribution of retinal ganglion cells in five mammalian species (pig, sheep, ox, horse, dog)," *Anat. Embryol.* **150**(1), 45-51 (1976).

Hebel R. and Holländer H. "Size and distribution of ganglion cells in the bovine retina," *Vision Res.* **19**(6), 667-674 (1979).

Heesy CP. "On the relationship between orbit orientation and binocular visual field overlap in mammals," *Anat. Rec. A Discov. Mol. Cell Evol. Biol.* **281**(1), 1104-1110 (2004).

Heffner RS and Heffner HE, "Visual factors in sound localization in mammals," *J. Comp. Neurol.* **317**(3), 219-232 (1992).

Helmchen F and Denk W. "Deep tissue two-photon microscopy," *Nature Meth.* **2**(12), 932-940 (2005).

Henze MJ, Schaeffel F and Ott M. "Variations in the off-axis refractive state in the eye of the Vietnamese leaf turtle (*Geoemyda spengleri*)," *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sens. Neural Behav. Physiol.* **190**(2), 131-137 (2004).

Hitzenberger CK. "Optical measurement of the axial eye length by laser Doppler interferometry," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **32**(3), 616-24 (1991).

- Howland HC, Howland M and Murphy CJ. "Refractive state of the rhinoceros," *Vision Res.* **33**(18), 2649-2651 (1993).
- Howland HC, Merola S and Basarab JR. "The allometry and scaling of the size of vertebrate eyes," *Vision Res.* **44**(17), 2043-2065 (2004).
- Hsu WH, Lee P and Betts DM. "Xylazine-induced mydriasis: possible involvement of a central postsynaptic regulation of parasympathetic tone," *J. Vet. Pharmacol. Ther.* **4**(3), 209-214 (1981).
- Huang D, Swanson EA, Lin CP, Schuman JS, Stinson WG, Chang W, Hee MR, Flotte T, Gregory K and Puliafito CA. "Optical coherence tomography," *Science*, **254**(5035), 1178-1181 (1991).
- Hughes A. *The Topography of Vision in Mammals of Contrasting Life Style: Comparative Optics and Retinal Organization*, Springer Verlag, Heidelberg (1977).
- Hughes A. "The refractive state of the rat eye," *Vision Res.* **17**(8), 927-939 (1977).
- Hughes A. "A useful table of reduced schematic eyes," *Vision Res.* **19**(11), 1273-1275 (1979).
- Hughes A and Vaney DI. "The refractive state of the rabbit eye: variation with eccentricity and correction for oblique astigmatism," *Vision Res.* **18**(10), 1351-1355 (1978).
- Irving EL, Sivak JG, Curry TA and Callender MG). "Chick eye optics: zero to fourteen days," *J. Comp. Physiol A* **179**(2), 185-194 (1996).
- Johnson LV and Hogemon GS. "Structural and compositional analyses of isolated cone matrix sheaths," *Invest. Ophthalmol. Vis Sci.* **32**(7), 1051-1057(1991).
- Johnston W. "O te quitas tú o te quita el toro," *El Ruedo* **924** (1962).
- Johnston W. *Introducción a la Tauromaquia*, Alianza Editorial (2000).
- Jones RK and Lee DN. "Why two eyes are better than one: the two views of binocular vision," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.* **7**(1), 30-40 (1981).
- Kavan P, Vlková E and Blazek J. "Accuracy of ultrasound measurements of the axial length of the eye," *Cesk Oftalmol.* **47**(2), 144-149 (1991).
- Karamanlidis AN and Magras J. "Retinal projections in domestic ungulates. II. The retinal projections in the horse and the ox," *Brain Res.* **66**(2), 209-225 (1974).
- Kassab A. "Ultrasonographic and macroscopic anatomy of the enucleated eyes of the buffalo (*Bos bubalis*) and the one-humped camel (*Camelus dromedarius*) of different ages," *Anat. Histol. Embryol.* **41**(1), 7-11 (2012).
- Kendrick KM. "Through a sheep's eye," *New Scientist* **1716**, 40-43 (1990).

- Kim YL, Walsh JT Jr., Goldstick TK and Glucksberg MK. "Variation of corneal refractive index with hydration," *Phys. Med. Biol.* **49**(5), 859-868 (2004).
- Konrade KA, Hoffman AR, Ramey KL, Goldenberg RB and Lehenbauer TW. "Refractive states of eyes and associations between ametropia and age, breed, and axial globe length in domestic cats," *Am. J. Vet. Res.* **73**(2), 279-284 (2012).
- Kreuzer RO and Sivak JG. "Chromatic aberration of the vertebrate lens," *Ophthalm. Physiol. Opt.* **5**(1), 33-41 (1985).
- Kubai MA, Bentley E, Miller PE, Mutti DO and Murphy CJ. "Refractive states of eyes and association between ametropia and breed in dogs," *Am. J. Vet. Res.* **69**(7), 946-951 (2008).
- Kuszak JR, Mazurkiewicz M, Jison L, Madurski A, Ngando A, Zoltoski RK. "Quantitative analysis of animal model lens anatomy: accommodative range is related to fiber structure and organization," *Vet. Ophthalmol.* **9**(5), 266-280 (2006).
- Land MF and Nilsson DE. *Animal Eyes*, 2nd ed., Oxford Animal Biology Series (2012).
- Leeson CR, Leeson T and Paparo A. *Textbook of Histology*, 5th ed., W.B. Saunders Co., London (1985).
- Mandelman T and Sivak JG. "Longitudinal chromatic aberration of the vertebrate eye," *Vision Res.* **23**(12), 1555-1559 (1983).
- Martin GR and Katzir G. "Visual fields in short-toed eagles, *Circaetus gallicus* (Accipitridae), and the function of binocularity in birds," *Brain Behav. Evol.* **53**(2), 55-66 (1999).
- Martin GR. "Visual fields and their functions in birds," *J. Ornithol.* **148**(2), 547-562 (2007).
- Martín Roldán R. "Fundamentos anatomo-funcionales de la visión en el toro de lidia," *III Semana Internacional del Toro de Lidia*. Salamanca. (1965).
- Mason WT, Fager RS and Abrahamson EW. "Ultrastructure of the receptor and epithelial layers of the bovine retina," *J. Anat.* **115**(Pt 2), 289-308 (1973).
- Mathis U, Schaeffel F and Howland HC. "Visual optics in toads (*Bufo americanus*)," *J. Comp. Physiol.* **163**(2), 201-213 (1988).
- McBrien NA, Moghaddam HO, New R and Williams LR. "Experimental myopia in a diurnal mammal (*Sciurus carolinensis*) with no accommodative ability," *J. Physiol.* **469**, 427-441 (1993).
- McCarty CA, Livingston PM and Taylor HR. "Prevalence of myopia in adults: implications for refractive surgeons," *J. Refract. Surg.* **13**(3), 229-234 (1997).
- Millodot M and Blough P. "The refractive state of the pigeon eye," *Vision Res.* **11**(9), 1019-1022 (1971).

- Mohammadi SF, Mazouri A, Jabbarvand M, Rahman-A N and Mohammadi A. "Sheep practice eye for ophthalmic surgery training in skills laboratory," *J. Cataract Refract. Surg.* **37**(6), 987-991 (2011).
- Murphy C and Howland H. "Owl eyes: accommodation, corneal curvature and refractive state," *J. Comp. Physiol. A* **151**(3), 277-84 (1983).
- Murphy CJ and Howland HC. "The optics of comparative ophthalmology," *Vision Res.* **27**(4), 599-607 (1987).
- Murphy CJ, Zodnik K and Mannisf MJ. "Myopia and refractive error in dogs," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **33**(8), 2459-2463 (1992a).
- Murphy CJ, Kern TJ and Howland HC. "Refractive state, corneal curvature, accommodative range and ocular anatomy of the Asian elephant (*Elephas maximus*)," *Vision Res.* **32**(11), 2013-2021 (1992b).
- Mutti DO, Mitchell GL, Moeschberger ML, Jones LA and Zadnik K. "Parental myopia, ner work, school achievement, and children's refractive error," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **43**(12), 3633-3640 (2002).
- Mutti DO, Zadnik K, Johnson CA, Howland HC and Murphy CJ. "Retinoscopic measurement of the refractive state of the rat," *Vision Res.* **32**(5), 583-586 (1992).
- Northmore DPM and Granda AM. "Ocular dimensions and schematic eyes of freshwater and sea turtles," *Vis. Neurosci.* **7**(6), 627-635 (1991).
- Ofri R, Millodot S, Shimoni R, Horowitz IH, Ashash and Millodot M. "Development of the refractive state in eyes of ostrich chicks (*Struthio camelus*)," *Am. J. Vet. Res.* **62**(5), 812-815 (2001).
- Ofri R, Millodot S, Tadmor Y, Matalon E, Kass PH, Horowitz IH and Millodot M. "The development of the refractive state in the newborn Thomson gazelle," *J. Comp. Physiol. A* **190**(10), 831-815 (2004).
- Olsen T. "The accuracy of ultrasonic determination of axial length in pseudophakic eyes," *Acta Ophthalmol.* **67**(2), 141-144 (1990).
- Paños Martí P. "Biotipos constitucionales del toro y se comportamiento en la lidia," *III Semana Internacional del Toro de Lidia, Salamanca* (1965).
- Paunksnis A, Svaldeniene E, Paunksniene M and Babrauskiene V. "Ultrasonographic evaluation of the eye parameters in dogs of different age," *Ultragarsas* **39**(2), 48-51 (2014).
- Pavlin CJ, McWhae JA, McGowan HD and Foster FS. "Ultrasound biomicroscopy of anterior segment tumors," *Ophthalmology* **99**(8), 1220-1228 (1992).
- Pettigrew JD, Bhagwandin A, Haagensen M and Manger PR. "Visual acuity and heterogeneities of retinal ganglion cell densities and the tapetum lucidum of the African elephant (*Loxodonta africana*)," *Brain Behav. Evol.* **75**(4), 251-261 (2010).

- Phillips C. *Cattle Behaviour and Welfare*, 2th ed., Backwell Science Ltd., Oxford (2002).
- Pierscionek BK and Augusteyn RC. "Growth related changes to functional parameters in the bovine lens," *Biochim. Biophys. Acta* **1116**(3), 283-290 (1992).
- Pinniger R. "Bull fighting," *Vet. Record* **122**(9), 215-216 (1988).
- Potter TJ, Hallowell GD and Bowen I. "Ultrasonographic anatomy of the bovine eye," *Vet. Radiol. Ultrasound* **49**(2), 172-175 (2008).
- Prince JH, Diesam CD, Eglitis I and Ruskell GL. *Anatomy and Histology of the Eye and Orbit in Domestic Animals*. Springfield CCT III (1960).
- Qiao-Grider Y, Hung LF, Kee CS, Ramamirtham R and Smith EL. "Nature of the refractive errors in rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) with experimentally induced ametropias," *Vision Res.* **50**(18), 1867-1881 (2010).
- Rafferty NS and Scholz DL. "Comparative study of actin filament patterns in lens epithelial cells. Are these determined by the mechanisms of lens accommodation?," *Curr. Eye Res.* **8**(6), 569-579 (1989).
- Rehkämper G and Görlach A. "Visual discrimination in adult dairy bulls," *J. Dairy Sci.* **80**(8), 1613-1621 (1997).
- Rehkämper G and Görlach A. "Visual identification of small sizes by adult dairy bulls," *J. Dairy Sci.* **81**(6), 1574-1580 (1998).
- Rehkämper G, Perrey A, Werner CW, Opfermann-Rüngeler C and Görlach A. "Visual perception and stimulus orientation in cattle," *Vision Res.* **40**(18), 2489-2497 (2000).
- Ribeiro AP, Silva ML, Rosa JP, Souza SF, Teixeira IA and Laus JL. "Ultrasonographic and echobiometric findings in the eyes of Saanen goats of different ages," *Vet. Ophthalmol.* **12**(5), 313-317 (2009).
- Robins A and Phillips C. "Lateralised visual processing in domestic cattle herds responding to novel and familiar stimuli," *Laterality* **15**(5), 514-534 (2010).
- Rochon-DuVigneaud, A. *Les Yeux et la Vision des Vertébrates*, Libraires de L'Academie de Medecine, Paris (1943).
- Rogers M, Cartee ER, Miller W and Ibrahim AK. "Evaluation of the extirpated equine eye using B-mode ultrasonography," *Vet. Radiol. Ultrasound* **27**(1), 24-29 (1986).
- Rose L, Yinon U and Belkin M. "Myopia induced in cats deprived of distance vision during development," *Vision Res.* **14**(10), 1029-1032 (1974).
- Ruiz T, Campos WN, Peres TP, Gonçalves GF, Ferraz, RH, Néspoli, PE, Sousa VR and Ribeiro AP. "Intraocular pressure, ultrasonographic and echobiometric findings of juvenile Yacare caiman (*Caiman yacare*) eye," *Vet. Ophthalmol.* **18**(s1), 40-45 (2015).

Rull-Cotrina J, Molleda JM, Gallardo J and Martín-Suárez E. "Refractive state of the Spanish Thoroughbred horse: a comparison with the crossbred horse," *Vet. Ophthalmol.* **16**(1), 25-28 (2013).

Samuelson DA. "Ophthalmic Anatomy," in: *Veterinary Ophthalmology*, 3rd ed., Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia (1999).

Sanz Egaña C. *Historia y Bravura del Toro de Lidia*, S. L. U. Espasa Libros (1958).

Sánchez Belda A. *Razas Bovinas Españolas*, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid (1984).

Saroori SI, Masoudifard MI, Raofi AI and Aghazadeh M. "Ultrasonographic findings of some ocular structures in Caspian miniature horse," *Iranian J. Vet. Res.* **10**(4), 329-333 (2009).

Saunders H. "Age-dependence of human refractive errors," *Ophthal. Physiol. Opt.* **1**(3), 159-174 (1984).

Schachar RA, Levay NS and Boney RC. "Accuracy of intraocular lens powers calculated from A-scan biometry with the Echo-Oculometer," *Ophthalmic Surg.* **11**(12), 856-858 (1980).

Schaeffel F and Howland HC. "Mathematical model of emmetropization in the chicken," *J. Opt. Soc. Am. A* **5**(12), 2080-2086 (1988).

Schaeffel F, Farkas L and Howland HC. "Infrared photoretinoscope," *Appl. Opt.* **26**(8), 1505-1509 (1987).

Schmidt-Nielsen K. *Scaling: why is animal size so important?*, Cambridge University Press (1984).

Schmit JR. *Diagnostic différential des affections avec atteinte oculaire chez les petits ruminants*, Tesis Doctoral, Université Claude-Bernard - Lyon I (2008).

Selarom KChT. *Manual del Buen Aficionado a las Corridas de Toros*. Unión de Bibliófilos Veterinarios Españoles (2009).

Shen W and Sivak JG. "Eyes of a lower vertebrate are susceptible to the visual environment," *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **48**(10), 4829-4837 (2007).

Sisson S., Grossman JD and Getty R. *The Anatomy of Domestic Animals*, Vol. 1, 5th ed., W. B. Saunders Company, Philadelphia, PA (1975).

Sivak JG and Kreuzer RO. "Spherical aberration of the crystalline lens," *Vision Res.* **23**(1), 59-70 (1983).

Sivak JG. "Accommodation in vertebrates: a contemporary survey," in: *Current Topics in Eye Research*, Zadunaisky JA and Davson H eds., Academic Press, New York (1980).

- Slatter D. "Structure and function of the eye," in: *Fundamentals of Veterinary Ophthalmology*, 3rd ed., W. B. Saunders Company, Philadelphia (2001).
- Su X, Vesco C, Fleming J, and Choh V. "Density of ocular components of the bovine eye," *Optom. Vis. Sci.* **86**(10), 1187-1195 (2009).
- Svaldenienė E, Paunksnienė M and Babrauskienė V. "Canine corneal thickness peculiarities in vivo and after eyeball enucleation," *Veterinarija ir Zootechnika.* **6**(28), 38-40 (1998).
- Tanimura I. "Comparative morphology of the bulbus oculi of the domestic animals revealed by scanning electron microscopy," *Jap. J. Vet. Sci.* **39**(6), 643-656 (1977).
- Tehrani M, Krummenauer F, Kumar R and Dick HB. "Comparison of biometric measurements using partial coherence interferometry and applanation ultrasound," *J. Cataract Refract. Surg.* **29**(4), 747-52 (2003).
- Tomkins LM, Thomson PC and McGreevy PD. "First-stepping Test as a measure of motor laterality in dogs (*Canis familiaris*)," *J. Vet. Behav. Clin. Appl. Res.* **5**(5), 247-255 (2010).
- Tortora GJ and Anagnostakos NP. "The special senses," in: *Principles of Anatomy and Physiology*, 3rd ed., N. Y. Harper and Row Publishing Inc., New York (1981).
- Troilo D and Wallman J. "The regulation of eye growth and refractive state: an experimental study of emmetropization," *Vision Res.* **31**(7-8), 1237-1250 (1991).
- Tseng SC, Smuckler D and Stern R. "Comparison of collagen types in adult and fetal bovine corneas," *J. Biol. Chem.* **257**(5), 2627-2633 (1982).
- Tuntivanich N, Petersen-Jones SM, Steibel JP, Johnson C and Forcier JQ. "Postnatal development of canine axial globe length measured by B-scan ultrasonography," *Vet. Ophthalmol.* **10**(1), 2-5 (2007).
- Uriarte L. *El Toro de Lidia*, Unión de Bibliófilos Taurinos, Madrid (1969)
- Valette R. *La Vision Chez les Bovides, Cas Particulier du Tareau de Combat*, Tesis Doctoral, Université Henri Poincaré - Nancy 1 (2002).
- Vollartigara G and Rogers LJ. "Survival with an asymmetrical brain: advantages and disadvantages of cerebral lateralization," *Behav. Brain Sci.* **28**(4), 575-589 (2005).
- Walls GL. *The Vertebrate Eye and its Adaptive Radiation*, Hafner Publishing Company (1942).
- Webb RH, Hughes GW and Delori FC. "Confocal scanning laser ophthalmoscope," *Appl. Opt.* **26**(8), 1492-1499 (1987).
- Wilkie DA and Whittaker C. "Surgery of the cornea," *Vet. Clin. North Am. Small Anim. Pract.* **27**(5), 1067-107 (1997).

Yinon U, Rose L, Shapiro A. "Myopia in the eye of developing chicks following monocular and binocular lid closure," *Vision Res.* **20**(2), 137-141 (1980).

Zarazaga I, Altarriba JA, Amorena B, Arruga MV, Lamuela M, Lasierra JM, Monge E, Piedrafita J, Vallejo M y Zaragoza MP. "Aspectos Genéticos en Ganaderías de Lidia," en: *Estudios sobre el Toro de Lidia 1978-1983*, Unión de Criadores de Toros de Lidia, Madrid (1984).

Zhou X, Qu J, Xie R, Wang R, Jiang L, Zhao H, Wen J and Lu F. "Normal development of refractive state and ocular dimensions in guinea pigs," *Vision Res.* **46**(18), 2815-2823 (2006).

Zhou X, Shen M, Xie J, Wang J, Jiang L, Pan M, Qu J and Lu F. "The development of the refractive status and ocular growth in C57BL/6 mice," *Invest. Ophthalmol. Vis. Science.* **49**(12), 5208-5214 (2008).

Agradecimientos

Hay personas que durante tu vida marcan el paso, te dejan una huella, que por pequeña o grande que sea te permite levantarte todas las mañanas sabiendo que tu existencia, en el fondo, tiene un sentido. Esta Tesis Doctoral no habría podido ver la luz si Juanma Bueno no hubiese decidido dedicarme parte (y mucha) de su existencia. Ha cogido de la mano a este italiano perdido entre el castellano y las “tapas” y, con el *savoir faire* de los físicos, lo ha vuelto a meter en el duro camino de la investigación. Me ha enseñado que la profesionalidad, la meticulosidad y la dedicación son indispensables en este trabajo, pero que la pasión y el entusiasmo nunca pueden faltar. Lo más importante que me llevo de estos años de trabajo es haber podido descubrir a un maestro y conocer a un buen amigo.

Quiero dar las gracias al co-director de esta Tesis, Juan Seva, que me ha permitido conocer de cerca la ciencia veterinaria, su forma de trabajar, su cercanía con el mundo animal y sus leyes. La simbiosis entre la Física y la Veterinaria nunca habría sido posible sin él. Sigo sin saber mucho de ese extenso campo, pero lo que he aprendido bajo su batuta es de agradecer infinitamente.

Una mención especial quiero dedicarle a Alberto Mas por su dedicación desinteresada durante estos años. Han sido muchas las tardes pasadas juntos entre toros y buen vino, me ha abierto la puerta de su casa, de sus gustos y de su gente. Un verdadero amigo.

No puedo dejar de mencionar en esta lista a Manolo Sanes, buen profesional y magnífica persona. Gracias por ayudarme a entender la sistemática de esos herraderos y por ser crítico con el concepto de “toro burriciego” que espero haya quedado claro en el presente trabajo. Este *carabinieri* quiere aprovechar estas líneas para felicitarte por tus 25 años de dedicación a la veterinaria taurina en la Plaza de Toros de la Condomina.

No quiero seguir sin citar a dos personas sin cuyo permiso nada de lo que aquí hay hubiese existido: Ángel Bernal, empresario de la Plaza de Toros de Murcia y Jorge Ibáñez, representante del hierro Nazario Ibáñez. Desde este rincón os doy las gracias por vuestro apoyo incondicional.

Tampoco quiero olvidarme de un extenso número de personas sin las cuales las medidas que aquí se han mostrado no hubiesen sido posible, todas en mayor o menor

medida han contribuido a que esta Tesis Doctoral sea una realidad: Pedro Vallejo, Pedro Sánchez, Encarna Alcón, Antonio Benito, Lucía Hervella, Juan Tabernero, Eloy Villegas, Pablo Artal y José M^a Marín.

A mi mujer Paula y a mis hijos, que todos estos años me han apoyado y han tenido que convivir con un marido/padre que a veces se paraba a mirar en el vacío sin sentido alguno.

A mis padres que, de lejos, me estimulan a seguir adelante. A mis suegros que siguen siendo pilares de mi familia aquí en España. A mi tía Mary y a mi tía Lorena que siempre han confiado en mis capacidades.

A Guido que se fue sin que me diera tiempo de abrazarle por última vez.

El veedor hizo su trabajo.
El lote en el sorteo me favoreció.
No me atreví con la porta gayola,
pero la verónica lo compensó.
Hubo algún puyazo que otro
y banderillas para acompañar,
aunque la faena de muleta
fue harina de otro costal.
Ahora es momento de entrar por derecho
para una estocada entera colocar.
Sueño con que sea a la primera
para dos orejas poder cortar.

“Es una señal segura que donde el toro pone la vista, allí parte.”

Pepe-Hillo (1754-1801)