GRUPO BLR

REPRODUCCIÓN BOVINA Y ESPECIES DOMÉSTICAS

ISBN: 978-9907-802-40-5

Freddy Fausto Macas Apolo

2026

REPRODUCCIÓN BOVINA Y ESPECIES DOMÉSTICAS

Freddy Fausto Macas Apolo

AUTOR



UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Macas, F. (2026) Reproducción bovina y especies domésticas
Grupo Editorial BLR.

© Freddy Fausto Macas Apolo

Reproducción bovina y especies domésticas.

ISBN: 978-9907-802-40-5

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIÓN DEL AUTOR

Freddy Fausto Macas Apolo

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: ffmacas@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0009-0002-9901-608X

PRÓLOGO

La reproducción animal es una disciplina que avanza con rapidez y demanda profesionales capaces de integrar conceptos fisiológicos, biotecnológicos y de manejo en un marco práctico. A lo largo de los años, he tenido la oportunidad de observar cómo este campo se transforma, impulsado por nuevas técnicas, nuevas preguntas y una renovada necesidad de eficiencia en los sistemas de producción. En este contexto, obras como la que el lector tiene en sus manos resultan especialmente valiosas, pues ofrecen una visión clara, actualizada y aplicable del quehacer reproductivo.

El autor presenta un enfoque estructurado y accesible, que combina fundamentos científicos con la experiencia acumulada en el trabajo académico y de campo. Esta integración logra un equilibrio poco común entre teoría y práctica, permitiendo que estudiantes, veterinarios y técnicos encuentren en estas páginas no solo explicaciones rigurosas, sino también herramientas reales para la toma de decisiones. Es precisamente ese carácter aplicado lo que convierte a este libro en un recurso necesario para quienes buscan comprender y mejorar los procesos reproductivos en especies domésticas.

A lo largo del texto, se percibe un compromiso genuino con la formación profesional y con el desarrollo de la producción animal en nuestra región. La claridad conceptual, el respaldo bibliográfico y la pertinencia temática reflejan la dedicación del autor y su interés por fortalecer las bases científicas en nuestras aulas y en el ejercicio clínico. Por ello, es

un honor acompañar esta obra con un prólogo que reconoce su aporte y celebra la iniciativa de poner al alcance de los lectores un material tan completo y cuidadosamente elaborado.

Invito al lector a adentrarse en estas páginas con el espíritu crítico y la curiosidad que caracterizan a los buenos profesionales. Estoy seguro de que encontrarán un contenido sólido y bien fundamentado, capaz de servir tanto como guía de estudio como referencia permanente en el ejercicio de la reproducción animal.

ÍNDICE

PRÓLOGO ..... **i**

ÍNDICE ..... **iii**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **x**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xi**

INTRODUCCIÓN ..... **xii**

CAPÍTULO I **13**

1 INTRODUCCIÓN A LA REPRODUCCIÓN ANIMAL **13**

1.1 Resumen 13

1.2 Objetivos de aprendizaje 13

1.3 Introducción 14

1.4 Historia de la reproducción animal 15

1.4.1 Importancia de la reproducción en especies animales 16

1.4.2 Evolución y origen de los órganos reproductores 18

1.5 Actividad autónoma 20

1.5.1 Descripción de la actividad 20

1.5.2 Resultado del aprendizaje 20

1.5.3 Autoevaluación Capítulo I 21

CAPÍTULO II **25**

2 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DEL APARATO REPRODUCTOR DE LA HEMBRA **25**

2.1 Resumen 25

2.2 Objetivos de aprendizaje 25
2.3 Introducción 26
2.4 Ovarios 27
2.5 Oviductos 30
2.6 Útero 31
2.7 Cérvix 33
2.7.1 Tipos de útero en mamíferos domésticos 34
2.8 Vagina 36
2.9 Vestíbulo 37
2.10 Clítoris 37
2.11 Vulva 38
2.12 Vascularización 39
2.13 Actividad autónoma 41
2.13.1 Descripción de la actividad 41
2.13.2 Resultado del aprendizaje 42
2.13.3 Autoevaluación Capítulo II 42
CAPÍTULO III 46
3 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DEL APARATO REPRODUCTOR DEL MACHO 46
3.1 Resumen 46
3.2 Objetivos de aprendizaje 46
3.3 Introducción 47

3.4 Escroto 48
3.5 Testículos 49
3.6 Cordón espermático 51
3.7 Vías espermáticas 52
3.8 Conductos eferentes 53
3.9 Epidídimo 53
3.10 Conducto deferente 54
3.11 Uretra 55
3.11.1 Uretra pélvica 55
3.11.2 Uretra peneana 55
3.11.3 Glándulas accesorias 56
3.12 Glándulas vesiculares 56
3.13 Próstata 57
3.13.1 Glándulas bulbouretrales 58
3.13.2 Pene 60
3.14 Actividad autónoma 64
3.14.1 Descripción de la actividad 64
3.14.2 Resultado del aprendizaje 64
3.14.3 Autoevaluación Capítulo III 65
CAPÍTULO IV 69
4 HORMONAS DEL SISTEMA REPRODUCTOR 69
4.1 Resumen 69

4.2 Objetivos de aprendizaje 69
4.3 Introducción 70
4.4 Glándulas endocrinas 71
4.5 Hipotálamo 71
4.6 Hipófisis 72
4.7 Gónadas 73
4.8 Eje hipotálamo-hipófisis gonadal en la hembra 73
4.9 Eje hipotálamo-hipófisis gonadal en el macho 74
4.10 Comunicación intercelular hormonal 76
4.11 Regulación de la secreción hormonal 76
4.12 Receptores hormonales 77
4.13 Hormonas 78
4.14 Hormonas hipotalámicas 79
4.14.1 Kisspeptina 81
4.14.2 GnRH 81
4.15 Hormonas adenohipofisiarias 82
4.15.1 Hormona foliculoestimulante 83
4.15.2 Hormona Luteinizante 84
4.15.3 Prolactina 84
4.16 Hormonas neurohipofisiarias 86
4.16.1 Oxitocina 86
4.17 Hormonas gonadales 88

4.17.1 Estrógenos 89
4.17.2 Andrógenos 91
4.17.3 Relaxina 92
4.17.4 Activinas 93
4.17.5 Folistatina 93
4.17.6 Hormona antimülleriana. 94
4.18 Hormonas placentarias 95
4.18.1 Gonadotropina coriónica equina 95
4.18.2 Lactógeno placentario 96
4.18.3 Proteína B 96
4.18.4 Hormonas uterinas 97
4.18.5 Prostaglandinas 97
4.19 Actividad autónoma 98
4.19.1 Descripción de la actividad 98
4.19.2 Resultado del aprendizaje 98
4.19.3 Autoevaluación Capítulo IV 99
CAPÍTULO V 102
5 CICLO ESTRAL 102
5.1 Resumen 102
5.2 Objetivos de aprendizaje 102
5.3 Introducción 103
5.4 Madurez sexual 103

5.4.1 Pubertad 104
5.5 Factores que influyen en la edad de pubertad 105
5.6 Ciclo estral 107
5.7 Fases del ciclo estral 107
5.7.1 Metaestro 109
5.7.2 Diestro 109
5.8 Actividad autónoma 112
5.8.1 Descripción de la actividad 112
5.8.2 Resultado del aprendizaje 113
5.8.3 Autoevaluación Capítulo V 113
CAPÍTULO VI 116
6 DINÁMICA FOLICULAR Y FOLICULOGÉNESIS 116
6.1 Resumen 116
6.2 Objetivos de aprendizaje 116
6.3 Introducción 117
6.4 Foliculogénesis 118
6.4.1 Crecimiento folicular 118
6.4.2 Composición lipídica del ovocito y líquido folicular 120
6.4.3 Bloqueo mitótico y reinicio de la meiosis 121
6.4.4 Dinámica folicular en rumiantes 122
6.5 Dinámica folicular en otras especies domésticas 123
6.6 Reclutamiento folicular 124

6.6.1 Selección y divergencia del folículo 125
6.6.2 Dominancia folicular 127
6.6.3 Atresia folicular 128
6.7 Actividad Autónoma 129
6.7.1 Descripción de la actividad 129
6.7.2 Resultado del aprendizaje 130
6.7.3 Autoevaluación Capítulo VI 130
BIBLIOGRAFÍA 134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Morfología de los ovarios de especies domésticas. 29

Tabla 2. Características de las glándulas accesorias de especies domésticas. 59

Tabla 3. Tipo de pene por especie. 62

Tabla 4. Edad aproximada de la pubertad en especies domésticas. 105

Tabla 5. Parámetros reproductivos del ciclo estral en especies domésticas. 111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Anatomía del aparato reproductor de la vaca..... 27
Figura 2. Ovario con dos cuerpos lúteos. 28
Figura 3. Ovarios con folículos. 28
Figura 4. Oviducto. 31
Figura 5. Útero de vaca. 32
Figura 6. Tipos de útero. 36
Figura 7. Labios vulvares..... 39
Figura 8. Aparato reproductor del macho. 48
Figura 9. Testículo y epidídimo. 51
Figura 10. Porción distal del pene. 62
Figura 11. Sistema hipotálamo neurohipofisiario. 80
Figura 12. Anatomía de la hipófisis. 83
Figura 13. Esquema de la eyección de la leche..... 88
Figura 14. Principales hormonas del ciclo estral de la vaca. 90
Figura 16. Presencia de cuerpo lúteo. 110
Figura 17. Ciclo estral de la hembra bovina. 110
Figura 18. Folículo maduro de Graaf. 128

INTRODUCCIÓN

La reproducción animal es un área que exige una comprensión clara y aplicada para poder responder a los desafíos reales que enfrentan estudiantes, veterinarios y productores en el campo. Este libro nace con la intención de ofrecer un material accesible, actualizado y útil, que acompañe al lector en la construcción de una base sólida y práctica sobre los procesos reproductivos en las especies domésticas. Mi propósito es proporcionar un recurso que permita integrar la teoría con las situaciones que vivimos día a día en la clínica y en los sistemas productivos.

En este compendio se busca facilitar el aprendizaje mediante explicaciones claras, contenido organizado y un enfoque orientado a la aplicación. La obra refleja tanto la experiencia académica como el trabajo desarrollado junto a estudiantes y profesionales en diferentes entornos productivos. Espero que este libro se convierta en una herramienta de consulta permanente y en un apoyo significativo para quienes desean comprender, mejorar y aplicar correctamente los principios de la reproducción animal.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN A LA REPRODUCCIÓN ANIMAL

1.1 Resumen

La reproducción animal constituye un proceso fundamental para la continuidad de las especies y tiene una relación directa con el desempeño de los sistemas pecuarios. Su conocimiento se ha construido a partir de diferentes aportes científicos que permitieron comprender progresivamente la fecundación, el desarrollo embrionario y la función de los órganos reproductores. En las especies domésticas, la reproducción también adquiere importancia productiva, debido a su relación con la obtención de crías, el reemplazo de animales y el aprovechamiento del potencial genético. El estudio del origen y evolución de los órganos reproductores permite, además, reconocer las diferencias anatómicas y funcionales que existen entre las especies. Este capítulo aborda estos antecedentes históricos, biológicos y productivos como base para el estudio posterior de la reproducción animal.

1.2 Objetivos de aprendizaje

- Reconocer los principales acontecimientos y aportes científicos que contribuyeron al desarrollo del conocimiento sobre la reproducción animal.
- Explicar la importancia biológica y productiva de la reproducción y su relación con el funcionamiento de los sistemas pecuarios.

- Identificar los principales aspectos relacionados con el origen y evolución de los órganos reproductores, considerando las diferencias que presentan las especies domésticas.

1.3 Introducción

En los sistemas de producción animal, el componente reproductivo tiene una influencia directa sobre los resultados obtenidos en el hato. Una adecuada respuesta reproductiva permite disponer de nuevas crías, mantener los reemplazos y aprovechar de mejor manera el potencial genético de los animales. En este sentido Hafez y Hafez (2000) destacan la importancia de la eficiencia reproductiva dentro del mejoramiento genético y del rendimiento animal. Por esta razón, conocer los procesos que intervienen en la reproducción constituye una base necesaria para establecer estrategias de manejo orientadas a mejorar los resultados productivos.

La actividad reproductiva depende de una regulación coordinada entre el sistema nervioso y el endocrino. En esta regulación interviene el eje hipotálamo–hipófisis–gónadas, responsable de controlar diferentes eventos de la función reproductiva. De acuerdo con Senger (2012), mediante la acción hormonal de este eje se regulan procesos como el desarrollo folicular, la ovulación y la espermatogénesis. Sin embargo, la respuesta reproductiva no se presenta de igual manera en todas las especies, debido a que puede estar condicionada por factores propios del animal y por aspectos relacionados con la nutrición y el ambiente. Estas diferencias deben ser consideradas al estudiar y manejar la reproducción de las especies domésticas.

La incorporación de biotecnologías reproductivas ha permitido ampliar las posibilidades de manejo y selección genética en los animales domésticos. Entre las técnicas de mayor aplicación se encuentran la inseminación artificial, la sincronización del estro, la transferencia de embriones y la fecundación in vitro. Su utilización facilita una mayor difusión del material genético proveniente de animales seleccionados y permite planificar de mejor manera los programas reproductivos. Cunningham (2014) destaca la utilidad de estas tecnologías para aprovechar el potencial de reproductores de alto valor genético y mejorar los resultados obtenidos dentro de los sistemas de producción.

El conocimiento de la anatomía y la fisiología reproductiva adquiere mayor utilidad cuando puede relacionarse con las situaciones que se presentan durante el manejo de los animales. Identificar los factores que afectan la función reproductiva permite interpretar problemas de fertilidad y establecer medidas orientadas a mejorar el desempeño reproductivo del hato. Noakes, Parkinson y England (2018) señalan la importancia de estos conocimientos para prevenir alteraciones reproductivas y favorecer tanto la fertilidad como el bienestar animal. Desde esta perspectiva, el estudio de la reproducción proporciona al estudiante y al profesional criterios que pueden ser aplicados posteriormente en la evaluación y el manejo reproductivo de las especies domésticas.

1.4 Historia de la reproducción animal

El conocimiento sobre la reproducción animal se fue construyendo a partir de diferentes observaciones y descubrimientos realizados a lo

largo de la historia. En el siglo IV a. C., Aristóteles formuló algunas de las primeras explicaciones acerca de la generación y el desarrollo embrionario (Aristotle, trad. 2011). Posteriormente, William Harvey planteó que los organismos tienen su origen en el huevo, concepto que tuvo gran importancia en el desarrollo de la embriología (Harvey, 1651/1981). Durante el siglo XVIII, los experimentos de Lazzaro Spallanzani aportaron evidencias sobre la participación del semen en la fecundación y permitieron realizar las primeras experiencias de inseminación artificial en animales domésticos (Spallanzani, 1784/1965). A estos avances se sumaron las observaciones microscópicas de Antonie van Leeuwenhoek, quien describió los espermatozoides y contribuyó al conocimiento de los gametos masculinos (Leeuwenhoek, 1677/1987). Estos aportes constituyeron antecedentes importantes para el posterior desarrollo de la fisiología y las biotecnologías de la reproducción.

1.4.1 Importancia de la reproducción en especies animales

La reproducción cumple un papel determinante tanto en la conservación de las especies como en el desempeño de los sistemas de producción animal. Roberts (1971) relaciona la eficiencia reproductiva con la productividad del hato, debido a su influencia sobre la obtención de crías y la disponibilidad de animales para el reemplazo. Una disminución de la fertilidad puede prolongar los intervalos entre partos y reducir el número de animales jóvenes incorporados al sistema, con las consecuentes repercusiones productivas y económicas. Hafez y Hafez (2000), por su parte, vinculan la reproducción con la posibilidad de

transmitir y aprovechar el potencial genético seleccionado en los animales.

La nutrición y la reproducción mantienen una relación estrecha dentro de los sistemas de producción animal. Van Soest (1994) señala que los alimentos proporcionan la energía y los nutrientes necesarios para sostener funciones como el mantenimiento, el crecimiento, la reproducción y la lactación. Por esta razón, la disponibilidad y utilización de los nutrientes adquieren importancia para que el animal pueda expresar adecuadamente sus funciones productivas y reproductivas. En bovinos, Wiltbank et al. (2016) destacan que el éxito reproductivo depende de diferentes procesos fisiológicos que determinan el establecimiento y mantenimiento de la gestación. En conjunto, estos aspectos muestran que la eficiencia reproductiva debe analizarse considerando también las condiciones nutricionales y productivas del animal.

El manejo reproductivo no depende únicamente de los eventos fisiológicos que ocurren en el animal, sino también de las condiciones bajo las cuales este se mantiene. Noakes, Parkinson y England (2018) consideran factores como la nutrición, la sanidad y el manejo dentro de los aspectos que pueden influir sobre la fertilidad. Su adecuada atención permite disminuir la presentación de problemas reproductivos y evitar la permanencia de animales improductivos en el rebaño. Senger (2012) relaciona, además, el manejo reproductivo con aspectos como la supervivencia neonatal y la permanencia productiva de los animales. De esta manera, la reproducción puede ser analizada no solo desde su

función biológica, sino también por su influencia sobre el funcionamiento de los sistemas de producción animal.

1.4.2 Evolución y origen de los órganos reproductores

El estudio del origen y la evolución de los órganos reproductores permite comprender muchas de las diferencias anatómicas y funcionales que actualmente se observan entre las especies. A lo largo del proceso evolutivo, las estructuras relacionadas con la reproducción experimentaron modificaciones asociadas con las condiciones de vida y las estrategias reproductivas de cada grupo. Estas adaptaciones dieron lugar a sistemas reproductores con características particulares, cuya organización responde a las necesidades reproductivas de cada especie.

La reproducción sexual representó un mecanismo importante para generar variabilidad genética en las poblaciones. Kardong (2012) describe que, en los vertebrados, las estructuras reproductivas experimentaron modificaciones progresivas durante su evolución. En los primeros vertebrados, la liberación de gametos al medio constituía una estrategia reproductiva frecuente; posteriormente, la adaptación a la vida terrestre exigió mecanismos que ofrecieran mayor protección a los gametos y al embrión. Estos cambios estuvieron acompañados por una mayor especialización de los órganos reproductores y por el establecimiento de la fecundación interna en diferentes grupos de vertebrados.

El origen de las gónadas en los vertebrados es comparable entre especies y se relaciona con el desarrollo embrionario temprano. Gilbert (2014)

explica que las gónadas se forman a partir de la cresta gonadal, un engrosamiento del mesodermo intermedio que inicialmente es indiferenciado. Bajo la influencia de genes reguladores como *SRY*, *SOX9* y *WNT4*, este tejido se transforma en testículos u ovarios según el patrón de diferenciación sexual de cada especie. Paralelamente, los conductos mesonéfricos y paramesonéfricos descritos por Romer y Parsons (1986) evolucionan para formar los sistemas de transporte gamético: los conductos de Wolff originan las estructuras masculinas, mientras que los conductos de Müller dan lugar a los oviductos, útero y porciones de la vagina.

En los mamíferos domésticos, los órganos reproductores presentan características anatómicas relacionadas con las funciones que cumplen durante la reproducción. Hafez y Hafez (2000) describen diferencias en la conformación del aparato reproductor entre las especies domésticas, tanto en el macho como en la hembra. En esta última, el útero y sus diferentes estructuras participan en el desarrollo de la gestación, mientras que en el macho la ubicación de los testículos en el escroto permite mantener condiciones térmicas adecuadas para la función testicular y la espermatogénesis.

Estas transformaciones a lo largo de millones de años consolidaron sistemas reproductivos altamente especializados, capaces de garantizar la transmisión de los genes y la perpetuación de las especies. Como resume Senger (2012), el sistema reproductor de los mamíferos actuales representa el resultado de una larga línea de adaptaciones evolutivas que integran funciones hormonales, anatómicas y fisiológicas para asegurar la continuidad de la vida. El conocimiento del origen de estas estructuras

facilita la comprensión de las diferencias reproductivas que se observan entre las especies domésticas.

1.5 Actividad autónoma

El lector analizará los principales acontecimientos que contribuyeron al desarrollo del conocimiento sobre la reproducción animal y relacionará estos antecedentes con su importancia biológica y productiva. Además, reconocerá los aportes de los autores estudiados en el capítulo y los principales aspectos relacionados con el origen de los órganos reproductores.

1.5.1 Descripción de la actividad

Para desarrollar la actividad, el lector deberá revisar el contenido del Capítulo 1 y responder las preguntas planteadas en la autoevaluación. Estas preguntas permitirán relacionar los principales acontecimientos históricos con los aportes de los autores estudiados, la importancia biológica y productiva de la reproducción y los aspectos abordados sobre el origen y evolución de los órganos reproductores.

1.5.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar la actividad, el lector será capaz de explicar la importancia biológica y productiva de la reproducción animal en los sistemas pecuarios, identificar los aportes históricos que contribuyeron a su estudio y reconocer los aspectos relacionados con el origen y evolución de los órganos reproductores en las especies domésticas.

1.5.3 Autoevaluación Capítulo I

1. ¿Qué autor afirmó que todos los organismos proceden del huevo, fundamento clave de la embriología moderna?

a. Aristóteles

b. Spallanzani

c. Harvey

d. Leeuwenhoek

2. ¿Cuál fue el aporte principal de Antonie van Leeuwenhoek a la reproducción animal?

a. Propuso los primeros conceptos de embriología

b. Observó por primera vez espermatozoides bajo el microscopio

c. Realizó las primeras inseminaciones artificiales

d. Describió los conductos de Wolff y Müller

3. ¿Quién realizó las primeras inseminaciones artificiales en animales domésticos?

a. Spallanzani

b. Roberts

c. Hafez

d. Kardong

4. Según Roberts (1971), ¿cuál es uno de los principales efectos de una reducción en la fertilidad del hato?

a. Mejora la calidad genética

b. Se reduce la variabilidad genética

c. Se incrementan los intervalos entre partos

d. Aumenta el consumo alimenticio

5. Según Van Soest (1994), los nutrientes obtenidos a partir de los alimentos contribuyen a sostener diferentes funciones del animal. ¿Cuál de las siguientes corresponde a una de ellas?

a. Reproducción

b. Selección genética

c. Sincronización del estro

d. Transferencia de embriones

6. ¿Cuál de los siguientes autores afirma que comprender nutrición, sanidad y manejo ayuda a reducir fallas reproductivas?

a. Gilbert (2014)

b. Noakes, Parkinson y England (2018)

c. Romer y Parsons (1986)

d. Senger (2012)

7. ¿Qué estructura embrionaria da origen tanto a ovarios como a testículos?

a. Conductos de Wolff

b. Mesodermo paraxial

c. Cresta gonadal

d. Conductos de Müller

8. Los conductos de Müller evolucionan para formar principalmente:

a. Epidídimo y conducto deferente

b. Escroto y pene

c. Oviductos, útero y parte de la vagina

d. Uretra y vesículas seminales

9. Según Hafez y Hafez (2000), el descenso testicular es una adaptación evolutiva importante porque:

a. Facilita la selección sexual

b. Permite el desarrollo placentario

c. Mantiene la temperatura óptima para la espermatogénesis

d. Aumenta la producción de testosterona

10. ¿Qué plantea Senger (2012) sobre el sistema reproductor de los mamíferos actuales?

a. Surgió exclusivamente por presiones ambientales recientes

b. Es el resultado de una larga serie de adaptaciones anatómicas y fisiológicas

c. No presenta variaciones significativas entre especies

d. Evolucionó independientemente de factores hormonales

CAPÍTULO II

2 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DEL APARATO REPRODUCTOR DE LA HEMBRA

2.1 Resumen

El aparato reproductor de la hembra está conformado por órganos cuya función conjunta permite la producción de ovocitos, la fertilización, el desarrollo embrionario y la gestación. Anatómicamente incluye ovarios, oviductos, útero, cérvix, vagina y vulva, cada uno con estructuras especializadas para sostener los eventos reproductivos Los ovarios participan en la producción de ovocitos y hormonas reproductivas (estrógenos y progesterona), esenciales para la regulación del ciclo estral. mientras que los oviductos intervienen en el transporte de los gametos y constituyen el sitio donde ocurre la fecundación. El útero proporciona las condiciones necesarias para el desarrollo de la gestación y experimenta cambios funcionales relacionados con la actividad hormonal. Por su parte, el cérvix, la vagina y la vulva participan en la protección del tracto reproductor, la cópula y el parto. La actividad de estas estructuras se encuentra estrechamente relacionada con la regulación hormonal, permitiendo que los diferentes eventos reproductivos se desarrollen de manera coordinada.

2.2 Objetivos de aprendizaje

- Describir la estructura anatómica de los órganos que conforman el aparato reproductor de la hembra, reconociendo sus características y variaciones entre especies domésticas.

- Explicar los procesos fisiológicos que regulan el ciclo estral, la ovulación y la función del cuerpo lúteo, comprendiendo la interacción entre hormonas y órganos reproductivos.
- Relacionar la anatomía y fisiología del aparato reproductor con los eventos reproductivos fundamentales como la fecundación, implantación y gestación para interpretar su importancia en la práctica clínica y productiva.

2.3 Introducción

El conocimiento del aparato reproductor de la hembra permite comprender la relación que existe entre sus estructuras anatómicas y los procesos que intervienen en la reproducción de las especies domésticas. Durante el ciclo reproductivo, estos órganos experimentan cambios funcionales relacionados con la actividad hormonal, el comportamiento estral, la fecundación y el establecimiento de la gestación. Su estudio también tiene importancia práctica, ya que permite interpretar diferentes condiciones reproductivas y constituye un apoyo para el manejo clínico y la aplicación de biotecnologías reproductivas. Los contenidos desarrollados en este capítulo servirán como referencia para comprender los procesos fisiológicos que se abordarán posteriormente.

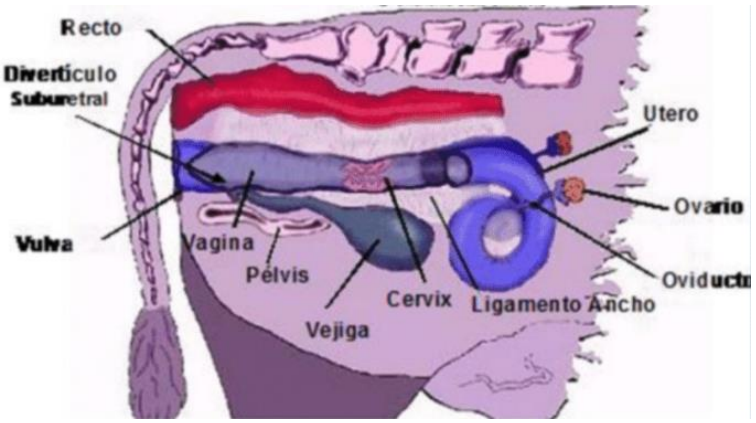


***Figura 1**. Anatomía del aparato reproductor de la vaca.*

Fuente: Porras Almeraya y Páramo Ramírez (2009).

2.4 Ovarios

Según Lenís Sanín (2014), los ovarios en la vaca son las gónadas responsables de la producción de gametos y de las manifestaciones fisiológicas que ocurren durante las fases del ciclo reproductivo. Estos órganos se localizan en la parte más caudal del abdomen, próximos al reborde pélvico, y presentan un tamaño variable entre 1 y 10 cm de longitud, con una forma ovoide e irregular.

Por su parte, Ungerfeld (2020) describe que los ovarios en los mamíferos domésticos se caracterizan por ser ovales o redondos, de consistencia firme y, en ocasiones, con aspecto nodular debido a los folículos que sobresalen. Además, resalta que no guardan una proporción constante con el tamaño corporal y que se encuentran sostenidos por el ligamento

ancho. En su parte craneal, este ligamento forma el mesovario, a través del cual ingresan vasos sanguíneos, linfáticos y nervios al órgano.

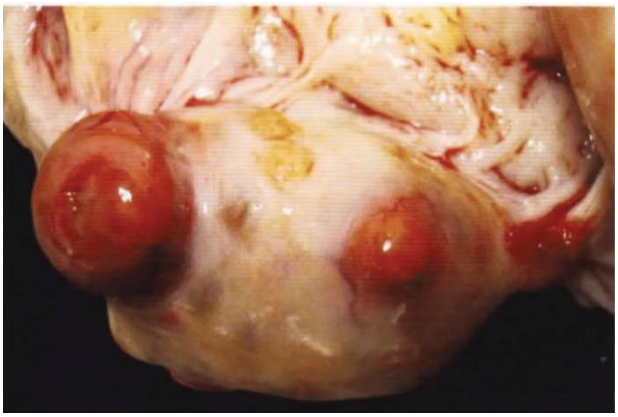


Figura 2. Ovario con dos cuerpos lúteos.

Fuente: *Fernández Sánchez (2008).*



Figura 3. Ovarios con folículos.

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se resume en un cuadro las diferentes características de los ovarios de las distintas especies.

Tabla 1. Morfología de los ovarios de especies domésticas.

Especie	Forma del ovario	Características morfológicas relevantes
Vaca (Bos taurus)	Almondada / elipsoidal	Superficie lisa (en vaquillonas) y más irregular en vacas adultas por cicatrices de ovulaciones previas; consistencia firme.
Yegua (Equus caballus)	Forma de riñón (reniforme)	Presenta una *fosa ovárica* exclusiva donde ocurre la ovulación; córtex central y médula periférica (inversión funcional).
Cerda (Sus scrofa)	Polilobulada / racimosa	Similar a un "racimo de uvas"; múltiples protrusiones que corresponden a folículos; muy activa reproductivamente.
Oveja (Ovis aries)	Ovoidal / pequeña	Similar a la vaca, pero más pequeño; superficie relativamente lisa.
Cabra (Capra hircus)	Ovoidal	Muy parecido al ovario ovino; tamaño ligeramente mayor y más alargado.
Perra (Canis familiaris)	Ovoide / pequeño	Cubierto por la bolsa ovárica que dificulta la ovulación hacia el exterior; superficie irregular durante estro.
Gata (Felis catus)	Ovoide / pequeño	Similar a la perra, pero más pequeño; ligeramente alargado; activo en especies poliéstricas estacionales.

Coneja (Oryctolagus cuniculus)	Alongado	Ovarios alargados con múltiples folículos visibles debido a la ovulación inducida.

Fuente: Adaptado de Dyce et al. (2010).

2.5 Oviductos

Los oviductos, también llamados trompas uterinas o salpinges, son conductos pares que conectan el ovario con el útero y constituyen el lugar donde habitualmente ocurre la fecundación en los mamíferos domésticos. Según Hafez y Hafez (2002), se dividen en tres regiones funcionales: infundíbulo, ampolla e istmo.

El infundíbulo, provisto de fimbrias, rodea parcialmente al ovario y captura el ovocito liberado durante la ovulación. La ampolla, una región amplia y rica en epitelio ciliado, favorece el movimiento del ovocito y constituye el sitio más común de fecundación (Senger, 2012). El istmo, más estrecho y de mayor musculatura, regula el transporte del embrión temprano hacia el útero mediante contracciones coordinadas y respuesta hormonal.

El epitelio del oviducto contiene células ciliadas y secretoras cuya actividad varía según el ciclo estral; sus secreciones crean un ambiente adecuado para la capacitación espermática, la fecundación y el desarrollo inicial del cigoto (Cunningham, 2014). La progresión del embrión hacia el útero depende del equilibrio entre estrógenos y progesterona, que modulan tanto el movimiento ciliar como la motilidad

oviductal (Senger, 2012). En conjunto, los oviductos actúan como una estructura esencial que enlaza la ovulación con la gestación temprana.

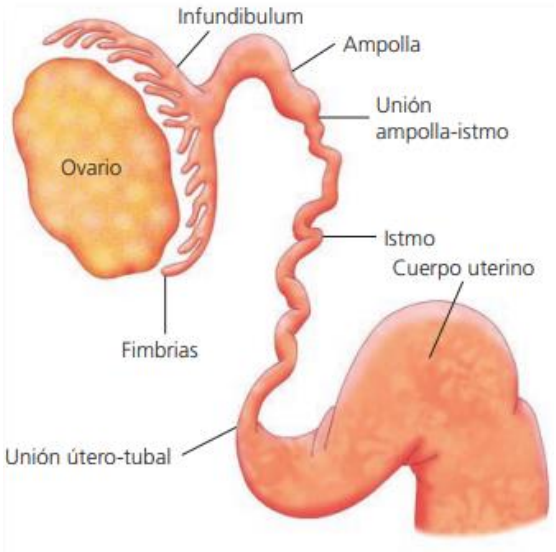


Figura 4. Oviducto.

Fuente: García Sacristán (2018).

2.6 Útero

De acuerdo con Ungerfeld (2020), el útero es la porción del tracto reproductivo que presenta las diferencias más notorias entre las distintas especies, ya que tanto su forma como su organización interna varían en los animales domésticos. Este autor también señala que el cuerpo uterino corresponde a un tubo muscular simple cuya longitud es variable: en las especies domésticas suele ser reducido, mientras que en la yegua alcanza un mayor desarrollo. Asimismo, describe que los cuernos uterinos, al igual que el cuerpo, son tubos musculares que divergen desde el extremo

craneal del útero, adoptando morfologías rectas en carnívoros y yeguas, y espiraladas en cerdas y rumiantes. Además, en algunas especies pueden presentarse pliegues peritoneales denominados ligamentos intercornuales.

Por su parte, Lenis Sanín et al (2014) describe que el útero está conformado por tres estructuras principales: el cuello, el cuerpo y dos cuernos divergentes. Explica que los ovarios se sitúan hacia el extremo craneal de los cuernos; sin embargo, debido a que estos se enrollan en espiral ventralmente, los ovarios adoptan una posición más caudal. También destaca que el útero se compone de tres capas: una externa serosa o perimetrio, una capa muscular denominada miometrio y una capa interna mucosa conocida como endometrio.

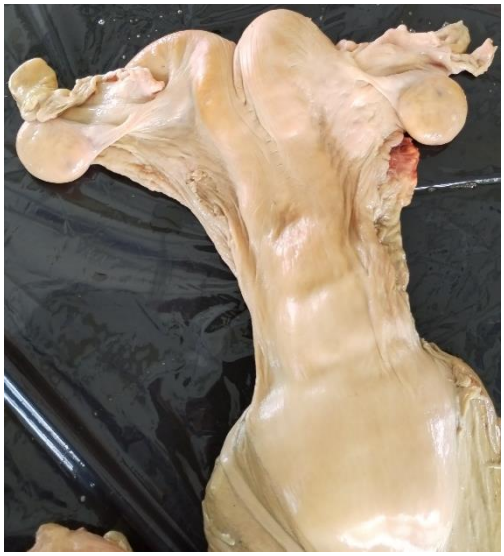


Figura 5. Útero de vaca.

Fuente: Elaboración propia.

2.7 Cérvix

Según Hafez y Hafez (2000), el cérvix de los rumiantes es una estructura fibromuscular altamente especializada cuya función principal es actuar como una barrera física y fisiológica entre la vagina y el útero. Estos autores destacan que su lumen presenta pliegues circulares prominentes denominados anillos cervicales que confieren una resistencia característica al paso de instrumentos y semen, excepto durante el estro, cuando se torna más permisivo bajo la influencia del estrógeno.

Noakes, Parkinson y England (2018), señalan que el cérvix bovino posee una mucosa con glándulas secretoras responsables de producir moco que varía en viscosidad según la fase del ciclo estral. Este cambio en la secreción contribuye tanto a facilitar la entrada de espermatozoides en el estro como a impedir el ascenso de patógenos durante la gestación.

Senger (2012), describe el cuello uterino como una estructura rígida compuesta por abundantes fibras de colágeno, lo que le confiere una consistencia firme al tacto rectal. Explica además que el cérvix sirve como reservorio y filtro para los espermatozoides, ya que durante el estro el moco cervical forma canales que permiten el avance de los gametos más móviles y sanos.

Dyce, Sack y Wensing (2010) resaltan que, anatómicamente, el cérvix de las vacas posee de 3 a 4 anillos dispuestos de manera asimétrica, razón por la cual el paso de una pipeta de inseminación requiere habilidad para sortear estas estructuras. También mencionan que el fórnix vaginal, ubicado en la porción más caudal del cérvix, forma un

fondo de saco que rodea parcialmente la entrada del canal cervical en la vagina.

La conformación del cérvix presenta diferencias importantes entre las especies domésticas. Hafez y Hafez (2000) describen en los rumiantes un cérvix robusto, caracterizado por la presencia de anillos cervicales prominentes que dificultan el avance de instrumentos a través del canal cervical. Esta característica puede observarse durante la inseminación artificial en bovinos, donde el paso de la pipeta requiere atravesar los anillos cervicales hasta alcanzar el cuerpo del útero. En la yegua, la disposición es diferente; Noakes, Parkinson y England (2018) describen un canal cervical más amplio y con pliegues longitudinales, lo que permite una manipulación distinta durante los procedimientos reproductivos. En la cerda, Dyce, Sack y Wensing (2010) señalan una disposición particular de los pliegues cervicales relacionada con la conformación del pene del verraco durante la cópula. Estas diferencias anatómicas adquieren especial importancia en la práctica reproductiva, debido a que la manipulación del cérvix y el sitio de deposición del semen varían entre las especies.

2.7.1 Tipos de útero en mamíferos domésticos

Desde el punto de vista anatómico, los úteros de los mamíferos se clasifican según el grado de fusión de los conductos paramesonéfricos (conductos de Müller) durante el desarrollo embrionario, lo que da origen a los tipos simple, bicorne, bipartido y doble. Esta diferenciación estructural se asocia estrechamente con la estrategia reproductiva de cada especie (Sisson & Grossman, 2006; Dyce, Sack & Wensing, 2010).

Esta organización presenta particularidades entre las especies domésticas. En los bovinos, el útero bicorne posee un cuerpo corto y dos cuernos moderadamente desarrollados; en ovinos y caprinos mantiene una conformación semejante, aunque de menor tamaño. La cerda presenta cuernos uterinos considerablemente más largos y tortuosos, donde pueden desarrollarse varios fetos durante la gestación. En caninos y felinos, los cuernos también son largos, pero de aspecto más delgado, y permiten la distribución de los fetos a lo largo del útero durante las gestaciones múltiples.

Una conformación diferente se observa en la yegua, cuyo útero es de tipo bipartido. En esta especie, el cuerpo uterino es amplio y los cuernos son relativamente cortos y poco divergentes, características relacionadas con una gestación generalmente única. El útero simple representa otro tipo de organización anatómica; carece de cuernos y presenta un cuerpo uterino único. Esta conformación es característica de los primates y no se encuentra en las especies domésticas de interés veterinario. Finalmente, el útero doble, que presenta dos cuerpos uterinos completamente separados y dos cérvix, se encuentra en especies como los roedores y lagomorfos, representando el menor grado de fusión de los conductos paramesonéfricos.

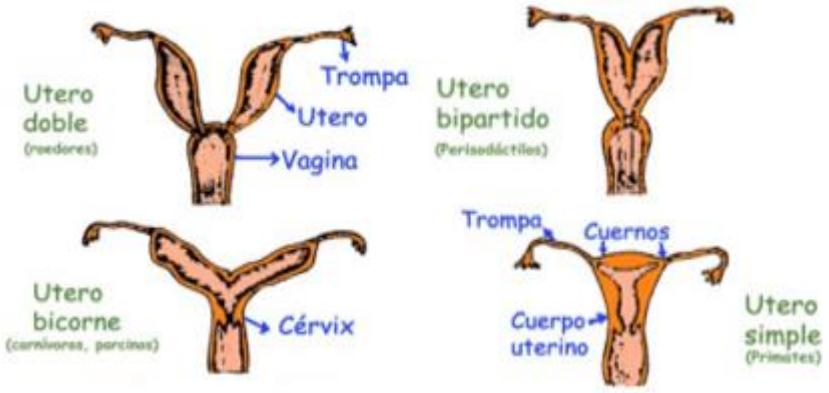


Figura 6. Tipos de útero.

Fuente: Tomado de Sánchez y Díaz (2006).

2.8 Vagina

De acuerdo con Lenis Sanín (2014), la vagina es una estructura tubular de naturaleza fibroelástica que presenta pliegues longitudinales en su interior. Está compuesta por la vagina propiamente dicha y el vestíbulo, cuyo límite lo marca el anillo himenal, una delgada membrana conocida como himen.

La vagina es el segmento del tracto reproductor femenino situado entre el cérvix y el vestíbulo, constituido por un canal musculomucoso capaz de distenderse ampliamente durante la cópula y el parto. Según Dyce, Sack y Wensing (2010), su mucosa posee un epitelio estratificado resistente que protege frente a fricciones y microorganismos, mientras que su capa muscular permite la contracción y el transporte espermático. Además, Evans y de Lahunta (2013) indican que la vagina actúa como receptáculo del semen, participa en la salida de secreciones uterinas y

constituye una importante barrera anatómica para impedir la ascensión de agentes patógenos hacia el útero.

2.9 Vestíbulo

El vestíbulo es la porción caudal del tracto reproductor femenino que se extiende desde el orificio externo de la uretra hasta la vulva. Según Dyce, Sack y Wensing (2010), esta región constituye un segmento anatómico compartido por los sistemas reproductor y urinario, y su mucosa presenta abundantes pliegues que facilitan la distensión durante la cópula y el parto. Los autores indican que su epitelio estratificado y su rica inervación sensitiva participan en la respuesta sexual y en la percepción táctil. Además, Evans y de Lahunta (2013) señalan que el vestíbulo contiene glándulas mucosas que lubrican la entrada vaginal y favorecen el paso del pene o del catéter durante la inseminación artificial. Su estructura muscular y su disposición anatómica contribuyen también a la protección del aparato reproductor frente a agentes externos.

2.10 Clítoris

Es un órgano eréctil homologado al glande del pene y se localiza en la comisura ventral de la vulva. König y Liebich (2016) describen que está compuesto por tejido cavernoso rodeado por fibras musculares lisas y tejido conectivo, y su cubierta epitelial contiene numerosas terminaciones nerviosas que le confieren una marcada sensibilidad. Este órgano participa en la respuesta sexual, pudiendo experimentar tumefacción bajo la influencia de los estrógenos durante el estro. Por su

parte, Dyce, Sack y Wensing (2010) destacan que la fosa clitoridiana puede variar entre especies y, en algunas —como la yegua—, posee relevancia clínica porque puede alojar microorganismos que interfieren con la reproducción si no se realiza una adecuada higiene previa a la inseminación.

2.11 Vulva

Según König y Liebich (2016), la vulva constituye la porción más externa del aparato reproductor femenino y está formada por dos labios que delimitan la hendidura vulvar a través de la cual se accede al vestíbulo. Su estructura cutáneo-mucosa actúa como una barrera protectora frente a agentes externos y participa en el mantenimiento de un adecuado cierre anatómico del tracto genital. Además, alberga en su comisura ventral al clítoris, órgano eréctil relacionado con la respuesta sexual. En conjunto, la vulva protege el sistema reproductivo y sirve como punto inicial de entrada para la cópula y los procedimientos reproductivos.

Por su parte, Ungerfeld (2020) describe que la vulva corresponde a la parte terminal y externa del tracto genital femenino, conformada por los labios derecho e izquierdo que se unen en las comisuras dorsal y ventral. Entre ambos labios se encuentra la hendidura vulvar, la cual comunica con el vestíbulo. Además, en la comisura ventral se ubica el clítoris, considerado el homólogo del pene.



Figura 7. Labios vulvares.

Fuente: Elaboración propia.

2.12 Vascularización

Getty (1993) indica que el ovario de los mamíferos domésticos recibe su aporte sanguíneo esencialmente a través de la arteria ovárica, un vaso visceral derivado directamente de la aorta abdominal.

En el caso particular del bovino, Del Campo y Ginther (1973) describen que esta arteria presenta una organización más compleja, ya que después de originarse en la aorta se divide en tres trayectos principales ovárico, tubárico y uterino, manteniendo una proximidad notable con las venas adyacentes.

Trabajos posteriores (Ginther & Del Campo, 1974; Lamond & Drost, 1974) señalan que, aunque el patrón arterial comparte rasgos con el observado en ovinos, el bovino posee una anastomosis útero-ovárica bien desarrollada entre la rama uterina de la arteria ovárica y una

colateral de la arteria uterina. Esta interconexión permite conservar el flujo sanguíneo incluso en situaciones donde la arteria ovárica pudiera verse comprometida quirúrgicamente.

En ovejas, los estudios histológicos de Del Campo y Ginther (1973) demostraron que, pese al contacto estrecho entre la arteria ovárica y la vena útero-ovárica, no existe comunicación vascular directa entre ellas. En esta especie, el oviducto depende principalmente de la irrigación proporcionada por la rama tubárica de la arteria ovárica.

En bovinos, Lamond y Drost (1974), junto con Del Campo y Ginther (1973), describen además la presencia de arcos anastomóticos formados por las ramas uterina y tubárica de la arteria ovárica, los cuales aseguran un suministro sanguíneo constante tanto al ovario como al oviducto.

La irrigación del ovario y del oviducto presenta algunas particularidades entre las especies. En ovejas, Del Campo y Ginther (1973) observaron que, aunque existe una estrecha relación entre la arteria ovárica y la vena útero-ovárica, no se presenta una comunicación vascular directa entre ambas. En esta especie, el aporte sanguíneo del oviducto proviene principalmente de la rama tubárica de la arteria ovárica. En bovinos, Del Campo y Ginther (1973) y Lamond y Drost (1974) describieron arcos anastomóticos formados por las ramas uterina y tubárica de la arteria ovárica, que participan en la irrigación del ovario y del oviducto.

En el útero bovino, la irrigación procede principalmente de la arteria uterina y se complementa con las ramas uterinas de las arterias vaginal y ovárica (Dobrowolski & Hafez, 1970; Del Campo & Ginther, 1974;

Lamond & Drost, 1974). Estas ramas establecen conexiones entre sí y con las del lado contralateral, formando una red vascular que abastece al útero. En la oveja, Dobrowolski y Hafez (1970) describieron dos trayectos principales de la arteria uterina: uno se dirige hacia la porción craneal del cuerno y recibe el aporte de la rama uterina de la arteria ovárica, mientras que el otro se distribuye hacia las regiones media y caudal. Junto con las ramas de la arteria vaginal y las conexiones contralaterales, esta distribución permite la irrigación del miometrio, el cuerpo uterino y el cérvix.

2.13 Actividad autónoma

2.13.1 Descripción de la actividad

El lector deberá analizar de forma crítica la anatomía y funciones del aparato reproductor de la hembra bovina y de otras especies domésticas, empleando para ello el capítulo leído y material de apoyo adicional. La actividad tiene como propósito fortalecer la comprensión de la estructura y función de ovarios, oviductos, útero, cérvix, vagina, vestíbulo, clítoris y vulva, integrando el conocimiento anatómico con su relevancia fisiológica y reproductiva.

Debe revisar cuidadosamente cada sección, relacionar estructuras con sus funciones y reconocer las variaciones anatómicas entre especies, aplicándolo en la resolución del cuestionario final.

2.13.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar la actividad, el lector será capaz de describir y diferenciar las estructuras que conforman el aparato reproductor de la hembra, considerando sus características anatómicas, sus variaciones entre especies y su participación en los procesos reproductivos.

2.13.3 Autoevaluación Capítulo II

1. ¿Cuál es la principal función de los ovarios según Lenís Sanín (2014)?

a. Actuar como depósito de semen

b. Producir gametos y regular las manifestaciones del ciclo reproductivo

c. Mantener la gestación mediante secreción hormonal placentaria

d. Controlar la motilidad uterina

2. ¿Qué estructura del oviducto captura el ovocito durante la ovulación?

a. Istmo

b. Infundíbulo

c. Fimbrias

d. Ampolla

3. ¿Qué capa del útero corresponde al tejido muscular responsable de las contracciones?

a. Endometrio

b. Perimetrio

c. Miometrio

d. Serosa interna

4. ¿Cuál es una característica distintiva del cérvix bovino?

a. Pliegues longitudinales suaves

b. Epitelio glandular simple

c. Anillos cervicales prominentes y asimétricos

d. Canal recto sin resistencia

5. En la cerda, la forma del cérvix se caracteriza por:

a. Pliegues longitudinales rectos

b. Estructura espiralada que encaja con el glande del verraco

c. Presencia de solo dos anillos cervicales

d. Canal liso sin pliegues

6. ¿Qué función cumple principalmente la vagina según Dyce et al. (2010)?

a. Producción de estrógenos

b. Filtrar espermatozoides

c. Actuar como receptáculo del semen y barrera contra patógenos

d. Participar en la implantación embrionaria

7. ¿Cuál de las siguientes estructuras marca el límite entre la vagina y el vestíbulo?

a. Fosa clitoridiana

b. Anillo himenal

c. Comisura ventral

d. Orificio uretral interno

8. ¿El clítoris es considerado homólogo de qué estructura del macho?

a. Prepucio

b. Pene (glande)

c. Testículo

d. Uretra pelviana

9. ¿Qué función principal desempeña la vulva?

a. Regular la secreción hormonal ovárica

b. Mantener la temperatura del tracto reproductivo

c. Constituir la barrera anatómica externa que protege el aparato reproductor

d. Favorecer la capacitación espermática

CAPÍTULO III

3 ANATOMÍA Y FISIOLOGÍA DEL APARATO REPRODUCTOR DEL MACHO

3.1 Resumen

El aparato reproductor del macho está constituido por testículos, epidídimos, conductos deferentes, uretra, glándulas accesorias y pene, estructuras que participan de manera coordinada en la función reproductiva. Los testículos intervienen en la producción de espermatozoides y en la secreción de testosterona, mientras que las vías espermáticas permiten la maduración, almacenamiento y transporte de los gametos masculinos. Las glándulas accesorias aportan las secreciones que forman parte del plasma seminal y el pene permite la deposición del semen en el aparato reproductor de la hembra. Además de estas funciones, existen diferencias anatómicas entre las especies domésticas que deben considerarse al estudiar el sistema reproductor masculino. En este capítulo se revisan las principales características anatómicas y funcionales de estos órganos y su participación en el proceso reproductivo.

3.2 Objetivos de aprendizaje

- Describir la anatomía del aparato reproductor del macho y la función específica de cada órgano involucrado en la producción y transporte de espermatozoides.

- Explicar los procesos de espermatogénesis y maduración espermática, así como su regulación endocrina y su importancia para la fertilidad.
- Relacionar la estructura y fisiología del sistema reproductor masculino con su impacto en la reproducción, la calidad seminal y las biotecnologías reproductivas.

3.3 Introducción

La función reproductiva del macho depende de la participación coordinada de diferentes estructuras encargadas de la producción, maduración y transporte de los espermatozoides. Los testículos cumplen un doble papel: generar gametos por medio de la espermatogénesis y secretar testosterona a través de las células de Leydig (Senger, 2012). Una vez formados, los espermatozoides continúan su recorrido por las vías espermáticas, donde experimentan cambios necesarios para adquirir su capacidad funcional; el epidídimo tiene una participación importante en este proceso (Hafez & Hafez, 2000). Posteriormente, durante la eyaculación, las secreciones de las glándulas accesorias se incorporan para formar el plasma seminal y el semen es conducido a través del aparato reproductor masculino hasta su deposición en la hembra. El conocimiento de estas estructuras y de la función que desempeñan permite comprender el proceso reproductivo del macho y las diferencias anatómicas que se presentan entre las especies domésticas.

El aparato genital del macho comprende bilateralmente el testículo, el epidídimo, el conducto deferente, las glándulas genitales accesorias y

las formaciones eréctiles unidas a la parte extrapelviana de la uretra que forman el pene. (Ungerfeld, 2020).

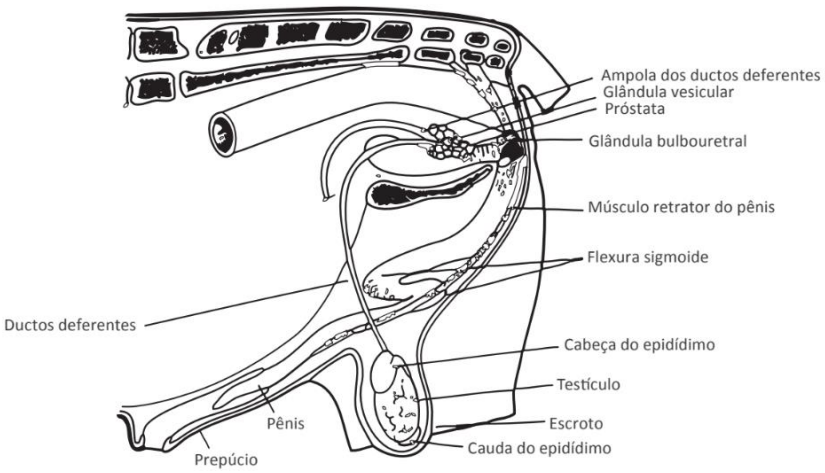


Figura 8. Aparato reproductor del macho.

Fuente: Henry y Loaiza Echeverri (2013).

3.4 Escroto

El escroto es una estructura cutánea que aloja y protege a los testículos, manteniéndolos a una temperatura inferior a la corporal para permitir la espermatogénesis.

Sisson y Grossman (2015) describen que está conformado por dos sacos separados, cada uno conteniendo un testículo, el epidídimo y parte del cordón espermático. Su pared está constituida por piel, músculo dartos, fascia espermática y túnica vaginal, estructuras que, además de recubrir y proteger el contenido escrotal, participan en el mantenimiento de las condiciones necesarias para la función testicular.

A nivel funcional, el mantenimiento de una temperatura testicular adecuada depende de la acción conjunta del escroto y de otras estructuras asociadas. Entre los principales mecanismos de termorregulación se encuentran el intercambio de calor a contracorriente, la acción de los músculos cremáster y dartos, y la pérdida de calor a través de la piel escrotal (Kastelic & Rizzoto, 2021):

- Intercambio de calor a contracorriente: se produce entre la arteria testicular y el plexo pampiniforme, favoreciendo la disminución de la temperatura de la sangre arterial antes de su llegada al testículo.
- Acción del músculo cremáster: sus contracciones modifican la posición de los testículos con respecto al cuerpo en respuesta a los cambios de temperatura.
- Sudoración escrotal: contribuye a la pérdida de calor por evaporación y adquiere particular importancia en especies como bovinos y equinos.
- Dyce, Sack y Wensing (2010) enfatizan que la integridad del escroto y su capacidad de termorregulación son indispensables para la producción espermática normal, ya que incluso elevaciones moderadas de la temperatura pueden comprometer la calidad seminal.

3.5 Testículos

Ungerfeld (2020) describe al testículo como la gónada masculina. Es un par de órganos que están, junto con el epidídimo en el fondo de la cavidad vaginal dentro del escroto. Con topografía variable según las

especies. El peso varía mucho en función de la edad, del estado fisiológico y de la especie.

Desempeñan un papel crucial en la reproducción, por lo tanto, el conocimiento de su fisiología, y especialmente de su regulación endocrina, es de suma importancia.

Según Wanke, M. M., & Gobello, C. (2006) tienen dos funciones básicas íntimamente relacionadas: la producción de espermatozoides y de hormonas, principalmente testosterona. Funcionalmente es posible distinguir en los testículos tres compartimientos.

- En el compartimiento intersticial, se encuentran las células de Leydig encargadas de la producción en especial de testosterona, aunque también se sintetizan dihidrotestosterona (DHT), dihidroepiandrosterona (DHEA), androstendiona y estradiol.
- Los otros dos compartimientos funcionales se encuentran en los túbulos seminíferos-las células espermatogénicas- que constituyen la porción exocrina del testículo, y las células de Sertoli que se encargan de la producción de inhibina, activina y una proteína ligadora de andrógenos (PLA); Además colaboran en la nutrición y mantenimiento de las células espermatogénicas y son el principal componente de la barrera hematotesticular.

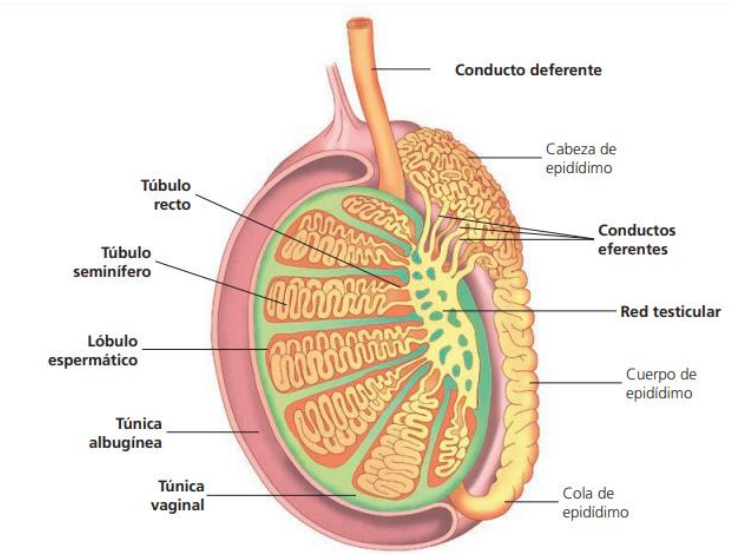


Figura 9. Testículo y epidídimo.

Fuente: García Sacristán (2018).

3.6 Cordón espermático

El cordón espermático es una estructura alargada que conecta cada testículo con la cavidad abdominal y sirve de soporte a los vasos sanguíneos, nervios y conductos relacionados con la función testicular.

König y Liebich (2014) señalan que está constituido por el conducto deferente, arteria testicular, el plexo pampiniforme, vasos linfáticos y nervios autónomos, estructuras que se encuentran rodeadas por las túnicas derivadas de la pared abdominal. Asociado al cordón espermático se encuentra también el músculo cremáster, cuya contracción modifica la posición del testículo.

Además de su función de sostén, el cordón espermático sirve como vía para el paso de vasos sanguíneos, linfáticos, nervios y el conducto deferente, y participa en la termorregulación testicular. Frandson, Wilke y Fails (2009) destacan la función del plexo pampiniforme en el intercambio de calor a contracorriente: la estrecha relación entre las venas del plexo y la arteria testicular permite disminuir la temperatura de la sangre arterial antes de su llegada al testículo, contribuyendo a mantener condiciones adecuadas para la espermatogénesis. El conducto deferente, por su parte, permite el transporte de los espermatozoides durante la eyaculación.

3.7 Vías espermáticas

Las vías espermáticas comprenden el conjunto de conductos que transportan los espermatozoides desde su lugar de producción hasta su expulsión durante la eyaculación. Incluyen los *conductos eferentes***,** *epidídimo***,** *conducto deferente* y la *uretra*, y su organización permite realizar funciones secuenciales: recolección, maduración, almacenamiento y conducción del gameto. Según Dyce, Sack y Wensing (2010), estos conductos no solo sirven de pasaje, sino que también participan activamente en la regulación del ambiente luminal, el movimiento del esperma mediante contracciones peristálticas y la preparación del eyaculado previo a la expulsión. Su integridad estructural y funcional es esencial para la fertilidad del macho.

3.8 Conductos eferentes

Los *conductos eferentes* constituyen la conexión entre la rete testis y la cabeza del epidídimo, y su función principal es transportar los espermatozoides recién formados hacia el epidídimo. De acuerdo con Dellmann y Eurell (2006), estos conductos presentan un epitelio ciliado que facilita el movimiento del gameto y realizan una importante absorción del fluido testicular, contribuyendo así a la concentración espermática inicial. Su actividad es esencial para el inicio del proceso de maduración epididimaria.

3.9 Epidídimo

Es un conducto tubular altamente enrollado, adosado al margen dorsal del testículo, que conecta los conductos eferentes con el conducto deferente. Está dividido en tres regiones: cabeza (caput), cuerpo (corpus) y cola (cauda), cada una con funciones específicas en el proceso reproductivo (Hafez & Hafez, 2000).

Anatómicamente, está recubierto por un epitelio seudoestratificado columnar compuesto principalmente por células principales con estereocilios que incrementan la superficie para la absorción y secreción, y células basales que actúan como soporte estructural y participan en la renovación celular (Robaire & Hinton, 2015).

Su principal función fisiológica es la maduración espermática, proceso durante el cual los espermatozoides adquieren movilidad progresiva y capacidad fecundante gracias a modificaciones en la membrana plasmática y cambios bioquímicos intracelulares (Bedford, 2018).

Además, el epidídimo contribuye a la concentración de espermatozoides mediante la absorción de fluido testicular en la cabeza, al transporte por contracciones peristálticas y al almacenamiento en la cola, donde los espermatozoides se mantienen viables en un ambiente de bajo metabolismo y reducida presión de oxígeno (Setchell, 2006).

El tiempo de tránsito epididimario varía según la especie: en bovinos es de aproximadamente 8–11 días, en caninos 10–14 días y en equinos 4–8 días, siendo este período crítico para completar la maduración funcional (Hafez & Hafez, 2000).

El funcionamiento del epidídimo está regulado por andrógenos, principalmente testosterona y dihidrotestosterona, que actúan junto con la proteína ligadora de andrógenos (ABP) para mantener concentraciones intraluminales de testosterona necesarias para la maduración espermática (Robaire & Hinton, 2015).

3.10 Conducto deferente

Se extiende desde la cola del epidídimo a la parte pelviana de la uretra. Después de haber transitado en el cordón espermático, el conducto deferente se dirige, más allá del anillo vaginal, sobre el costado de la cavidad pelviana y luego en la cara dorsal de la vejiga. (Ungerfeld, 2020).

Según Kenhub (2023) y E-Bookshelf (2021), Su función principal es transportar espermatozoides desde el epidídimo hacia la uretra. Durante la emisión (fase inicial de la eyaculación), la inervación simpática desencadena contracciones peristálticas que propulsan el contenido.

3.11 Uretra

La uretra del macho es un conducto único que sirve como vía de salida tanto para la orina como para el semen. *Frandson, Wilke y Fails (2009)* señalan que la uretra se divide funcionalmente en dos segmentos:

3.11.1 Uretra pélvica

Se localiza dentro de la cavidad pélvica y recibe las desembocaduras de los conductos deferentes y de las glándulas accesorias. Su porción inicial está rodeada por el *músculo uretral***,** que contribuye al control del flujo durante la eyaculación.

3.11.2 Uretra peneana

Continúa desde la salida pélvica e ingresa en el cuerpo del pene, recorriéndolo hasta el glande.
Según *König y Liebich (2014)***,** esta porción está alojada dentro del cuerpo esponjoso, cuyo tejido vascular amortigua la presión durante la erección y protege la luz uretral para permitir el paso del semen.

Los autores coinciden en que la disposición anatómica y la extensión de la uretra varían entre especies, siendo particularmente larga y estrecha en los rumiantes, lo que explica su mayor predisposición a obstrucciones uretrales por cálculos o tapones de moco.

3.11.3 Glándulas accesorias

Las glándulas accesorias son estructuras exocrinas que contribuyen a la formación del plasma seminal, medio indispensable para la supervivencia, transporte y funcionalidad de los espermatozoides.

Dellmann y Eurell (2006) explican que estas glándulas secretan componentes que proporcionan nutrientes, regulan el pH y facilitan la movilidad espermática, además de participar en la formación del coágulo seminal en algunas especies.

3.12 Glándulas vesiculares

La glándula vesicular está situada entre la vejiga y el recto. Cubriendo la cara dorsal de la vejiga. Su conducto se une al conducto deferente para formar el conducto eyaculador, que atraviesa la próstata antes de abrirse en la uretra por medio del orificio eyaculador. (Ungerfeld, 2020).

Según la *University of Minnesota College of Veterinary Medicine* (s. f.), las glándulas vesiculares están presentes en rumiantes, equinos y suinos, pero ausentes en perro y gato.

Las glándulas vesiculares aportan gran parte del volumen del plasma seminal (según la especie), con secreciones ricas en fructosa (sustrato energético), prostaglandinas, citrato, vitaminas y enzimas; su secreción es ligeramente alcalina, lo que ayuda a amortiguar el pH. Estas características contribuyen a la nutrición y protección de los espermatozoides mediante sustratos energéticos, antioxidantes y tampones; favorecen el transporte y mezcla del eyaculado gracias a las

contracciones simpáticas durante la emisión; y participan en el fraccionamiento del semen, pues en el semental la fracción gel procede principalmente de las vesiculares y se descarta en la evaluación, mientras que en el verraco la fracción gel procede de las bulbouretrales y las vesiculares contribuyen al volumen de las fracciones líquidas (CNBiotecnología, 2021; McKay & Kolesov, 2023; Sebastián-Abad et al., 2021).

3.13 Próstata

Es un complejo glandular formado por una parte conglomerada, conocida como cuerpo de la próstata, y por lóbulos diseminados sobre el trayecto de la uretra, conocidos como parte diseminada de la próstata. El cuerpo de la próstata es inexistente en los carneros y los machos cabríos. (Ungerfeld, 2020).

En el perro, la próstata es la única glándula accesoria y se encuentra bien desarrollada, mientras que en rumiantes suele predominar la forma diseminada y en el equino se presenta en forma compacta bilateral (Hafez & Hafez, 2000; Sun et al., 2017).

En cuanto a su función, la próstata secreta un fluido rico en iones (particularmente calcio, zinc y fosfato), enzimas como la fosfatasa ácida, proteínas y factores tampones, que contribuyen a mantener la viabilidad espermática y a neutralizar el ambiente vaginal. En perros y equinos, el fluido prostático constituye una fracción importante del volumen total eyaculado; en rumiantes y suinos, la contribución es

menor en comparación con las vesiculares (McKay & Kolesov, 2023; Hafez & Hafez, 2000).

Así, la próstata cumple un papel esencial en la fertilidad del macho, ya que su secreción participa en la activación de los espermatozoides, protección contra estrés oxidativo y en la facilitación del transporte seminal a través de la uretra durante la eyaculación (Sun et al., 2017).

3.13.1 Glándulas bulbouretrales

Las glándulas bulbouretrales también denominada glándulas de Cowper, son estructuras pares localizadas dorsalmente a la uretra pélvica, próximas al arco isquiático. Su desarrollo varía entre las especies: están ausentes en el perro, son vestigiales en el gato, presentan un desarrollo moderado en equinos y rumiantes, y alcanzan un tamaño considerable en el verraco (Dyce, Sack & Wensing, 2010).

Estas glándulas producen una secreción mucosa que contribuye a la lubricación y acondicionamiento de la uretra antes del paso del semen. En el verraco, la secreción de las glándulas bulbouretrales contribuye a la formación de la fracción gelatinosa característica del eyaculado. En equinos y rumiantes, estas glándulas producen secreciones que se incorporan antes o durante la eyaculación y contribuyen al acondicionamiento de la uretra para el paso del semen.

Tabla 2. Características de las glándulas accesorias de especies domésticas.

Especie	Vesículas seminales	Próstata	Bulbouretrales	Observaciones relevantes
Toro (Bos taurus)	Presentes	Presentes	Presentes	Las vesículas seminales son grandes y lobuladas; próstata pequeña.
Carnero (Ovis aries)	Presentes	Presentes	Presentes	Distribución similar al bovino; próstata de dos partes.
Cabra (Capra hircus)	Presentes	Presentes	Presentes	Muy similar al ovino.
Caballo (Equus caballus)	Presentes	Presentes	Presentes	Vesículas seminales muy voluminosas; próstata bien desarrollada.
Cerdo (Sus scrofa)	Muy desarrolladas	Grande	Muy desarrolladas	Cerdo tiene todas las glándulas de mayor tamaño; gran volumen seminal.

Perro (Canis familiaris)	Ausentes	Única y prominente	Ausentes	El perro solo posee próstata.
Gato (Felis catus)	Ausentes	Pequeña	Presentes	Carece de vesículas seminales; posee próstata y gl. bulbouretrales.
Conejo (Oryctolagus cuniculus)	Bien desarrolladas	Presentes	Presentes	Posee todas las glándulas accesorias.
Camélidos (llama, alpaca)	Ausentes	Pequeña	Presentes	Ausencia de vesículas seminales característica del grupo.

Fuente: Dyce et al. (2010); Hafez y Hafez (2000); University of Minnesota College of Veterinary Medicine (s. f.); Samuelson (2013).

3.13.2 Pene

Ungerfeld (2020) define al pene como el principal órgano copulador del macho, compuesto por una raíz, un cuerpo y un glande, todos ellos formados por estructuras eréctiles que rodean la porción extrapelviana de la uretra. Anatómicamente, está constituido por los cuerpos cavernosos, el cuerpo esponjoso del pene y el cuerpo esponjoso del glande, cuya función conjunta es permitir la erección, la eyaculación y la deposición del semen en el tracto reproductor de la hembra.

El cuerpo del pene representa la mayor parte del órgano y varía considerablemente entre especies. Según Ungerfeld (2020), es un tallo cilindroide, aunque en el caballo tiende a estar ligeramente aplanado lateralmente. En gatos y conejos su longitud es reducida, mientras que en rumiantes y porcinos es más largo y presenta una flexura sigmoidea, que se endereza durante la erección. En equinos, por el contrario, el pene es de mayor volumen y posee una capacidad eréctil más marcada debido al predominio del tejido cavernoso.

Desde el punto de vista estructural, el pene posee tejido eréctil constituido por espacios vasculares que reciben sangre durante la erección. En su funcionamiento también intervienen los músculos isquiocavernoso y bulboesponjoso, relacionados con el mantenimiento de la erección y con la expulsión del semen durante la eyaculación. La túnica albugínea constituye una cubierta fibrosa formada principalmente por fibras de colágeno y componentes elásticos, cuya disposición contribuye a las características de rigidez del órgano (McEntee, 1990).

La erección es un proceso neurovascular en el que intervienen cambios en el flujo sanguíneo del tejido eréctil. Durante este proceso aumenta la entrada de sangre hacia los espacios vasculares del pene y disminuye el retorno venoso, lo que permite alcanzar y mantener la turgencia necesaria para la cópula (Senger, 2012). Durante la eyaculación, la contracción coordinada de la musculatura asociada al aparato reproductor permite la expulsión del semen a través de la uretra y su posterior deposición en el tracto reproductor de la hembra.

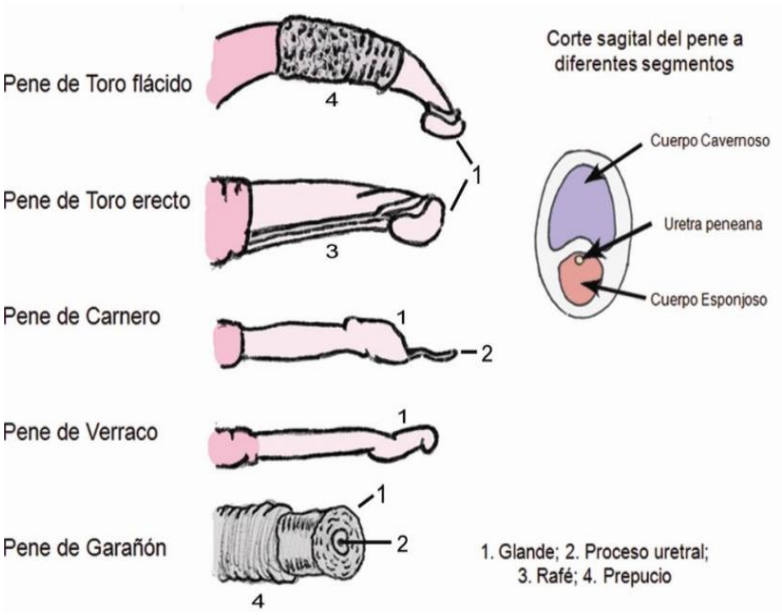


Figura 10. Porción distal del pene.

Fuente: Sánchez y Díaz (2006).

A continuación, se resume el tipo de pene respecto a cada especie.

Tabla 3. Tipo de pene por especie.

Especie	**Tipo de pene**	**Flexura sigmoidea**	**Morfología del glande**	**Particularidades funcionales**
Toro	Fibroelástico	Presente (preescrotal)	Glande poco desarrollado, redondeado	Erección con escaso aumento de volumen, gran rigidez; rápida cópula

Carnero (ovino)	Fibroelástico	Presente	Posee un filamento uretral (“processus urethralis”)	Eyaculación muy rápida; diámetro uretral fino
Chivo (caprino)	Fibroelástico	Presente	Filamento uretral largo y móvil	Eyaculación pulsátil muy característica
Verraco (cerdo)	Fibroelástico	Presente (postescrotal)	Glande en forma de “sacacorchos”	Se ancla en el cérvix de la cerda; eyaculado muy voluminoso
Caballo (semental)	Musculovascular	Ausente	Glande en forma de “hongo” con corona prominente	Gran incremento del volumen durante la erección; cópula prolongada
Perro	Musculovascular	Ausente	Glande dividido en bulbo del glande y pars longa	“Nudo” copulatorio por tumefacción del bulbo; larga cohábita
Gato	Musculovascular	Ausente	Glande pequeño con espículas queratinizadas	Las espículas inducen ovulación (refleja); erección dependiente de andrógenos

Conejo	Musculovascular	Ausente	Glande alargado, liso	Cópula muy rápida; eyaculación en segundos

Fuente:. Adaptado de Dyce et al. (2010); Getty (1993); Hafez y Hafez (2000); Cunningham y Klein (2014); Reece (2015).

3.14 Actividad autónoma

3.14.1 Descripción de la actividad

El lector analizará las estructuras que conforman el aparato reproductor del macho y relacionará sus características anatómicas con la función que desempeñan durante el proceso reproductivo. A partir de los contenidos revisados, elaborará un cuadro comparativo del escroto, testículos, cordón espermático, vías espermáticas, glándulas accesorias y pene, identificando las principales diferencias anatómicas y funcionales entre bovinos, equinos, porcinos, caninos y felinos. Como complemento de la actividad, resolverá un cuestionario orientado a integrar los conocimientos adquiridos sobre la anatomía y fisiología reproductiva del macho.

3.14.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar la actividad, el lector será capaz de describir la organización anatómica y funcional del aparato reproductor del macho, relacionando las principales estructuras con su función reproductiva y reconociendo las variaciones existentes entre las especies domésticas. Además, podrá explicar el trayecto de los espermatozoides a través de las vías

espermáticas y la participación de las glándulas accesorias en la formación del plasma seminal.

3.14.3 Autoevaluación Capítulo III

1. ¿Cuál es la principal función del escroto?

a. Producir hormonas androgénicas

b. Mantener los testículos a una temperatura adecuada para la espermatogénesis

c. Generar contracciones para expulsar semen

d. Lubricar la uretra durante la eyaculación

2. ¿Qué células producen testosterona en el testículo?

a. Células de Sertoli

b. Células espermatogénicas

c. Células de Leydig

d. Células mioides

3. ¿Cuál de las siguientes estructuras participa en el intercambio térmico contracorriente?

a. Músculo cremáster

b. Plexo pampiniforme

c. Fascia espermática

d. Glándula bulbouretral

4. ¿Cuál es la función principal del epidídimo?

a. Producir prostaglandinas

b. Mantener la temperatura testicular

c. Madurar, concentrar y almacenar espermatozoides

d. Producción de líquido prostático

5. Los conductos eferentes conectan:

a. Los túbulos seminíferos con la uretra

b. La rete testis con la cabeza del epidídimo

c. La cola del epidídimo con la próstata

d. El conducto deferente con el glande

6. La función principal del conducto deferente durante la emisión es:

a. Regular el pH del plasma seminal

b. Transportar espermatozoides mediante contracciones peristálticas

c. Secretar enzimas

d. Producir la fracción gelatinosa del eyaculado

7. ¿Cuál de las siguientes especies carece de glándulas vesiculares?

a. Bovino

b. Equino

c. Perro

d. Suino

8. ¿Qué glándula está especialmente desarrollada en el verraco y produce una fracción gelatinosa?

a. Próstata

b. Glándula vesicular

c. Glándula bulbouretral

d. Glándula de Cowper

9. La túnica albugínea del pene se caracteriza por:

a. Ser una capa mucosa que forma el glande

b. Ser una capa fibrosa que confiere rigidez y contención al tejido eréctil

c. Producir óxido nítrico

d. Secretar líquido lubricante

10. El mecanismo de erección depende principalmente de:

a. Aumento de presión linfática en los testículos

b. Contracción sostenida del músculo cremáster

c. Vasodilatación mediada por óxido nítrico en los cuerpos cavernosos

d. Reducción del volumen sanguíneo en el pene

CAPÍTULO IV

4 HORMONAS DEL SISTEMA REPRODUCTOR

4.1 Resumen

La interacción hormonal regula los procesos reproductivos en machos y hembras. Este sistema está controlado por el eje hipotálamo–hipófisis–gónadas, encargado de coordinar la maduración folicular, la ovulación, la espermatogénesis, el mantenimiento del cuerpo lúteo y la gestación.

En este eje, la GnRH de origen hipotalámico induce la liberación hipofisaria de FSH y LH. Estas gonadotropinas actúan sobre las gónadas y participan en procesos como el desarrollo folicular y la síntesis de esteroides sexuales. A su vez, ovarios y testículos producen hormonas como estradiol, progesterona y testosterona, que intervienen en los mecanismos de retroalimentación positiva o negativa del eje reproductivo. La regulación hormonal también comprende la participación de prolactina, inhibina, relaxina y diferentes hormonas relacionadas con el metabolismo, cuyas acciones contribuyen al funcionamiento reproductivo. La respuesta coordinada de estas señales interviene en la ciclicidad, la fertilidad y las manifestaciones conductuales asociadas con la reproducción.

4.2 Objetivos de aprendizaje

- Reconocer las principales hormonas que participan en la reproducción, considerando su lugar de producción, sus funciones y su participación dentro del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas.

- Relacionar la actividad hormonal con procesos reproductivos como la foliculogénesis, la ovulación, la espermatogénesis y el mantenimiento del cuerpo lúteo.

- Analizar los mecanismos de retroalimentación endocrina y su importancia para la ciclicidad y la fertilidad en las especies domésticas.

4.3 Introducción

La reproducción animal depende de una compleja red de señales hormonales que coordinan el funcionamiento del aparato reproductor y permiten la expresión de la fertilidad. Este sistema se organiza en torno al eje hipotálamo–hipófisis–gónadas, donde cada nivel participa liberando hormonas que regulan el crecimiento folicular, la ovulación, la función luteal y la espermatogénesis. Senger (2012) destaca el carácter pulsátil de la secreción de GnRH y su participación en la regulación endocrina de la actividad reproductiva. A partir de esta señal se produce la liberación de gonadotropinas hipofisarias que intervienen en la función de las gónadas. En la hembra, el estradiol y la progesterona participan en los cambios ováricos y uterinos asociados con el ciclo reproductivo y la gestación, mientras que en el macho la testosterona interviene en la espermatogénesis y en la expresión del comportamiento sexual. La regulación de estos procesos incluye además la participación de otras hormonas, entre ellas la inhibina, la prolactina y la relaxina, junto con señales metabólicas que pueden influir sobre la función reproductiva.

4.4 Glándulas endocrinas

Las *glándulas endocrinas* son órganos especializados que producen y liberan hormonas directamente al torrente sanguíneo, sin utilizar conductos, permitiendo que estos mensajeros químicos regulen funciones fisiológicas en órganos distantes. Su actividad se caracteriza por una secreción finamente controlada mediante mecanismos de retroalimentación, principalmente hipotalámico–hipofisario. Estas glándulas como hipófisis, tiroides, gónadas y suprarrenales mantienen la homeostasis, el crecimiento, el metabolismo y la reproducción mediante señales hormonales específicas que actúan sobre células blanco con receptores propios (Guyton & Hall, 2011).

4.5 Hipotálamo

Su organización comprende diferentes áreas y núcleos especializados. En la región rostral se localizan estructuras como los núcleos supraóptico, supraquiasmático, anterior, ventromedial y arcuato, mientras que otras regiones hipotalámicas incluyen núcleos y áreas que participan en distintas funciones de regulación neuroendocrina.

Desde el punto de vista endocrino, el hipotálamo actúa como un centro de integración entre el sistema nervioso y el sistema hormonal. Su actividad permite regular diferentes funciones del organismo mediante señales neuroendocrinas que controlan la secreción hormonal. En el ámbito reproductivo, esta función adquiere especial importancia por su participación en el control del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas.

Sus funciones abarcan el control del hambre, la sed, los ritmos circadianos, la termorregulación, las emociones, la reproducción y el comportamiento sexual, entre otros procesos vitales.

En esta región se distinguen dos poblaciones principales de neuronas secretoras: las magnocelulares, que producen oxitocina y arginina-vasopresina y proyectan sus axones hasta la neurohipófisis; y las parvocelulares, que liberan diversos tipos de hormonas o inhibidores hormonales tras integrar señales provenientes de estímulos como olores, sabores o ciclos de luz, información que el hipotálamo recibe tanto de los ojos como de otras áreas del encéfalo.

En conjunto, estas características reflejan el papel central del hipotálamo en la homeostasis y la regulación neuroendocrina (Megías, Molist & Pombal, s. f.).

4.6 Hipófisis

Hafez y Hafez (2000) indican que la hipófisis se ubica en la silla turca, una depresión ósea situada en la base del cerebro, y está conformada por tres partes anatómicas: los lóbulos anterior, intermedio y posterior. Existen diferencias entre especies, destacándose que la porción intermedia se encuentra bien desarrollada en bovinos y equinos. En el lóbulo anterior, se identifican cinco tipos celulares responsables de la secreción de seis hormonas: las somatotrópicas producen hormona del crecimiento; las corticotrópicas, hormona adenocorticotrópica (ACTH); las mamotrópicas, prolactina; las tirotrópicas, hormona estimulante de

la tiroides (TSH); y las gonadotrópicas secretan tanto hormona foliculoestimulante (FSH) como luteinizante (LH).

Por su parte, García Sacristán (2018) describe que la neurohipófisis, también denominada lóbulo posterior, está formada por pituicitos y fibras nerviosas amielínicas provenientes de neuronas neurosecretoras del hipotálamo. Estas fibras transportan oxitocina y hormona antidiurética (ADH), sintetizadas en núcleos hipotalámicos específicos, hasta sus terminales axónicas, donde son liberadas en los capilares sanguíneos del lóbulo posterior de la hipófisis.

4.7 Gónadas

De acuerdo con Hafez y Hafez (2000), las gónadas en ambos sexos cumplen una doble función: por un lado, la producción de células germinales mediante la gametogénesis y, por otro, la secreción de hormonas gonadales. En el macho, las células de Leydig, ubicadas en el tejido intersticial entre los túbulos seminíferos, producen testosterona. En la hembra, la síntesis de estrógenos durante el desarrollo folicular depende de la actividad conjunta de las células de la teca interna y de la granulosa. Después de la ovulación, estas células experimentan cambios que dan origen al cuerpo lúteo, estructura encargada principalmente de la producción de progesterona.

4.8 Eje hipotálamo-hipófisis gonadal en la hembra

El funcionamiento del ciclo estral depende de la integración hormonal del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas. En este sistema, el hipotálamo libera de manera pulsátil la hormona liberadora de gonadotropinas

(GnRH), cuya frecuencia y amplitud varían según la fase del ciclo. La GnRH actúa sobre la adenohipófisis, estimulando la secreción de las gonadotropinas hormona luteinizante (LH) y hormona foliculoestimulante (FSH).

Estas, a su vez, regulan la dinámica ovárica: la FSH promueve el crecimiento folicular y la producción de estradiol (E_2), mientras que la LH induce la ovulación y sostiene la función del cuerpo lúteo. Los ovarios, mediante la secreción de estradiol y progesterona, ejercen retroalimentación positiva o negativa sobre el hipotálamo y la hipófisis, modulando así la liberación de GnRH, LH y FSH según la etapa del ciclo.

Este mecanismo de retroalimentación permite la transición ordenada entre fases proestro, estro, metaestro y diestro y garantiza la coordinación entre la maduración folicular, la ovulación, la luteinización y la preparación uterina para una posible gestación (Senger, 2012; Hafez y Hafez, 2000).

4.9 Eje hipotálamo-hipófisis gonadal en el macho

La función reproductiva del macho depende de una coordinación precisa entre el hipotálamo, la hipófisis y los testículos, formando el eje hipotálamo–hipófisis–gónada. Este sistema regula la producción de espermatozoides, la secreción de esteroides sexuales y la expresión del comportamiento reproductivo.

Según Senger (2012), el principal regulador del eje es la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH), secretada en pulsos por el

hipotálamo. Esta liberación pulsátil estimula a la adenohipófisis a secretar las gonadotropinas FSH y LH, las cuales actúan sobre poblaciones celulares específicas del testículo. La FSH se une a los receptores de las células de Sertoli, promoviendo la síntesis de proteínas de sostén, la producción de factores tróficos indispensables para la espermatogénesis y la secreción de inhibina, hormona que ejerce retroalimentación negativa selectiva sobre la liberación hipofisaria de FSH.

Por otro lado, Knobil y Neill (2006) describen que la LH actúa sobre las células de Leydig, estimulando la producción de testosterona. Este andrógeno es esencial para la progresión de la espermatogénesis, la diferenciación sexual masculina y el mantenimiento de los caracteres sexuales secundarios. Además, la testosterona interviene en la regulación del apetito sexual, la erección y la función peneana mediante su acción sobre receptores androgénicos presentes en el tejido eréctil.

Cunningham y Klein (2014) señalan que la espermatogénesis requiere concentraciones elevadas de testosterona en el ambiente intratesticular. La regulación de esta hormona permite mantener las condiciones necesarias para el desarrollo de las células germinales, mientras que su concentración en la circulación general es comparativamente menor. La actividad reproductiva del macho también comprende mecanismos neuroendocrinos relacionados con la función del pene, en los que participan mediadores como el óxido nítrico (NO), las prostaglandinas y los andrógenos. Estos mecanismos forman parte de la respuesta fisiológica que permite el adecuado funcionamiento del aparato reproductor masculino.

4.10 Comunicación intercelular hormonal

Según Dobrescu (1998), la comunicación intercelular resulta indispensable para mantener la coordinación fisiológica en los organismos multicelulares. En el caso del sistema endocrino, este proceso se realiza mediante la secreción de hormonas producidas por glándulas especializadas, las cuales pasan al torrente sanguíneo y alcanzan células blanco distantes que poseen receptores específicos. Este mecanismo se denomina comunicación endocrina. Sin embargo, no es la única forma de señalización, ya que también se distinguen la comunicación paracrina, en la que las señales actúan sobre células vecinas; la autocrina, en la cual una célula responde a sus propios mensajeros; y la yuxtacrina, que requiere contacto directo entre células adyacentes. Cada una de estas modalidades interviene en procesos fisiológicos particulares como el crecimiento, la reproducción y la respuesta inmunitaria. Para que ocurra la respuesta biológica, las células blanco deben poseer afinidad y especificidad por la hormona, garantizando así que solo determinados tejidos reaccionen ante señales concretas.

4.11 Regulación de la secreción hormonal

La secreción hormonal está regulada por mecanismos fisiológicos que permiten al sistema endocrino responder de manera precisa a las necesidades del organismo. De acuerdo con Guyton y Hall (2011), existen tres formas principales de regulación: humoral, hormonal y neural. En la regulación humoral, la concentración sanguínea de ciertas sustancias, como glucosa, calcio o iones, actúa directamente como

estímulo para la liberación hormonal. Un ejemplo clásico es la secreción de parathormona en respuesta a la disminución del calcio plasmático.

La regulación hormonal ocurre cuando una hormona controla la secreción de otra, como sucede en los ejes endocrinos. En el sistema reproductor, la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) secretada por el hipotálamo estimula la liberación de la hormona foliculoestimulante (FSH) y la hormona luteinizante (LH) desde la adenohipófisis, las cuales actúan sobre las gónadas regulando la esteroidogénesis y la gametogénesis. Este tipo de control se integra mediante mecanismos de retroalimentación positiva y negativa ejercidos principalmente por los esteroides gonadales.

Por su parte, García Sacristán (2018) señala que la regulación neural se basa en impulsos nerviosos que desencadenan la liberación hormonal, especialmente en hormonas neurohipofisarias. Un ejemplo representativo es la liberación de oxitocina durante el reflejo de eyección de la leche, en el cual estímulos sensoriales procedentes de la glándula mamaria activan centros hipotalámicos que inducen la secreción hormonal.

En conjunto, estos mecanismos de regulación actúan de forma integrada y coordinada, garantizando la estabilidad endocrina y el adecuado funcionamiento del sistema reproductor en las especies domésticas.

4.12 Receptores hormonales

Según Guyton y Hall (2011), las hormonas ejercen sus efectos fisiológicos al unirse a receptores específicos localizados en la

membrana o dentro de la célula blanco. Las hormonas hidrosolubles, como la LH, FSH o la insulina, no atraviesan la membrana plasmática, por lo que actúan sobre receptores de superficie que desencadenan la activación de segundos mensajeros intracelulares, tales como AMPc e IP_3/DAG (vía fosfatidilinositol). En contraste, las hormonas liposolubles, como los estrógenos, la progesterona o la testosterona, atraviesan con facilidad la membrana y se unen a receptores intracelulares, modulando la transcripción génica.

Por su parte, Molnar y Gair (2015) destacan que la respuesta celular depende del número de receptores presentes en la célula blanco, el cual puede aumentar (*upregulation*) o disminuir (*downregulation*) en función de la estimulación endocrina previa.

Finalmente, Senger (2012) enfatiza que estos mecanismos de acción y regulación son determinantes en la fisiología reproductiva, pues permiten respuestas precisas y controladas en procesos como la ovulación, la luteinización, la implantación y la espermatogénesis.

4.13 Hormonas

Según Guyton y Hall (2011), las hormonas son mensajeros químicos producidos por células especializadas, en su mayoría pertenecientes a glándulas endocrinas. Una vez secretadas, se transportan por el torrente sanguíneo hasta órganos distantes donde actúan sobre células blanco específicas. Su función principal es regular procesos fisiológicos esenciales como el crecimiento, el metabolismo, la reproducción, la homeostasis y la conducta. Para ejercer sus efectos, requieren unirse de

manera específica a receptores celulares, desencadenando así respuestas biológicas precisas.

Complementando esta visión, Senger (2012) señala que en el ámbito reproductivo las hormonas primarias regulan directamente procesos como la espermatogénesis, la ovulación, el comportamiento sexual, la fecundación, la implantación, el mantenimiento de la gestación, el parto, la lactancia y el comportamiento materno. A su vez, describe que existen hormonas secundarias o metabólicas, cuya acción influye en la reproducción de forma indirecta al modificar el ambiente fisiológico del organismo.

Por su parte, Hafez y Hafez (2000) destacan que las principales hormonas relacionadas con la reproducción provienen de cuatro sistemas u órganos fundamentales: el hipotálamo, la hipófisis (lóbulos anterior y posterior), las gónadas, testículos y ovarios, además del útero y la placenta.

4.14 Hormonas hipotalámicas

Según Ilera Marín (1994), todas las hormonas hipotalámicas son sintetizadas en los cuerpos celulares de las neuronas que las secretan, siguiendo un proceso similar al de otras hormonas peptídicas. A partir de aminoácidos que se ensamblan en los ribosomas según el código genético, la cadena resultante se traslada al retículo endoplásmico rugoso, para luego ser procesada en el aparato de Golgi. Posteriormente, estas moléculas se concentran en gránulos secretorios que viajan por flujo axoplásmico hacia las terminaciones nerviosas, donde quedan

almacenadas hasta que se produce el estímulo apropiado para su liberación. Dichos gránulos pueden sufrir procesamiento adicional antes de estar listos para la secreción. Diversos estímulos, como señales térmicas, lumínicas, hormonales o metabólicas, actúan sobre las neuronas superiores liberando neurotransmisores entre ellos norepinefrina, epinefrina, dopamina, serotonina, acetilcolina, GABA, glutamato y aspartato, los cuales modifican el potencial de membrana de las neuronas hipotalámicas e inducen la síntesis y secreción de hormonas específicas. La liberación se realiza mediante un mecanismo de exocitosis dependiente de calcio.

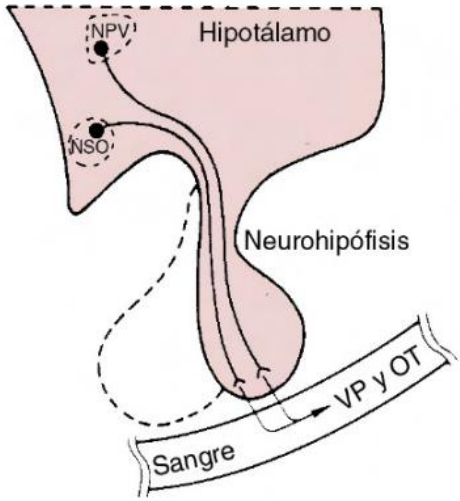


Figura 11. Sistema hipotálamo neurohipofisiario.

Fuente: Cunningham y Klein (2014).

Por su parte, Hafez y Hafez (2000) señalan que, en relación con la reproducción, el hipotálamo produce principalmente la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) y el factor inhibidor de la prolactina (PIF). Además, indican que este órgano es también la fuente

de oxitocina y vasopresina, hormonas que se almacenan en la neurohipófisis hasta el momento de su liberación.

4.14.1 Kisspeptina

Según Ungerfeld (2020), la kisspeptina corresponde a un grupo de péptidos descubiertos en 1996 que se producen en el hipotálamo y cuya principal función es estimular la liberación de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH).

Clarke, Dhillo y Jayasena (2015) explican que la kisspeptina está codificada por el gen **KISS1** y se produce en regiones específicas del hipotálamo, principalmente en los núcleos arcuato y preóptico. Estos autores destacan que actúa como activador central de GnRH, desencadenando la cascada hormonal que conduce a la secreción de LH y FSH.

Por su parte, Xie et al. (2022) señalan que la kisspeptina ejerce su acción uniéndose a su receptor específico **KISS1R**, lo que activa vías de señalización intracelular que estimulan la secreción de GnRH. De esta manera, regula el funcionamiento del eje hipotálamo-hipófisis-gónadas y desempeña un papel esencial en el control de la reproducción.

4.14.2 GnRH

Según García Sacristán (2018), la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) es una neurohormona compuesta por una cadena peptídica de diez aminoácidos que actúa sobre las células gonadotrópicas de la adenohipófisis, induciendo la liberación de las

gonadotropinas LH y FSH. En las hembras, la actividad ovárica depende de la producción de GnRH en el centro de pulsos y el centro tónico de síntesis basal, desde donde las neuronas secretoras transportan la hormona a través del sistema porta hipotálamo-hipofisario. La liberación de GnRH se presenta en pulsos que determinan una respuesta periódica de las gonadotropinas hipofisarias. Este patrón de secreción resulta necesario para mantener la actividad de las células gonadotrópicas; por el contrario, una exposición continua a GnRH exógena puede disminuir su respuesta y reducir la liberación de LH y FSH. La actividad de las neuronas productoras de GnRH también se encuentra relacionada con áreas del sistema nervioso que participan en la conducta reproductiva, estableciendo una conexión entre la regulación endocrina y el comportamiento sexual.

4.15 Hormonas adenohipofisiarias

Las gonadotropinas hormona foliculoestimulante (FSH) y hormona luteinizante (LH) son hormonas glicoproteicas sintetizadas y secretadas por las células gonadotrópicas de la adenohipófisis en respuesta a la estimulación pulsátil de la hormona liberadora de gonadotropinas (GnRH) proveniente del hipotálamo. Estas hormonas ejercen su acción principal sobre las gónadas, donde regulan procesos esenciales como la foliculogénesis, la ovulación, la esteroidogénesis y la espermatogénesis. Desde el punto de vista estructural, la FSH y la LH están formadas por dos subunidades, una α común y una β específica, cuya variabilidad puede verse influenciada por la edad, el sexo y el estado endocrino del individuo, así como por la retroalimentación ejercida por los esteroides sexuales gonadales (Cunningham & Klein, 2014; Guyton & Hall, 2011).

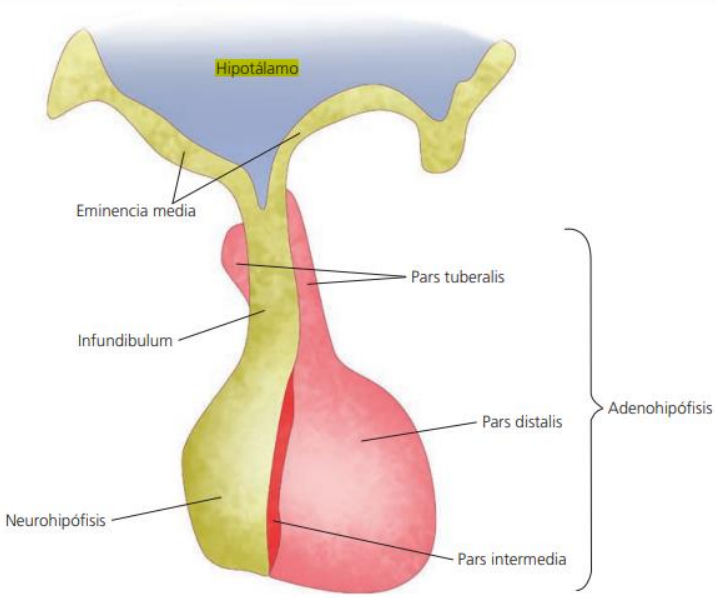


Figura 12. Anatomía de la hipófisis.

Fuente: Cunningham y Klein (2014).

4.15.1 Hormona foliculoestimulante

La hormona foliculoestimulante (FSH) desempeña un papel esencial en la regulación de la función gonadal en ambos sexos. En la hembra, la FSH estimula el crecimiento y la maduración de los folículos ováricos al actuar sobre receptores localizados en las células de la granulosa. Esta hormona induce la síntesis de aromatasa, enzima responsable de la conversión de andrógenos en estrógenos, y prepara al folículo para responder a la acción de la hormona luteinizante (LH) durante la fase preovulatoria. La producción de estrógenos depende de la acción coordinada de la FSH y la LH, ya que la FSH por sí sola no es suficiente para mantener una secreción estrogénica adecuada.

En el macho, la FSH actúa principalmente sobre las células de Sertoli de los túbulos seminíferos, estimulando la espermatogénesis mediante la regulación del ambiente intratesticular, la síntesis de proteínas de soporte y la producción de inhibina, la cual participa en la retroalimentación negativa selectiva sobre la secreción hipofisaria de FSH (Hafez y Hafez, 2000; Cunningham & Klein, 2014).

4.15.2 Hormona Luteinizante

La hormona luteinizante recibe su denominación por su papel fundamental en la ovulación y en la transformación del folículo preovulatorio en cuerpo lúteo. En la hembra, la LH actúa sobre las células de la teca interna estimulando la síntesis de andrógenos, los cuales sirven como precursores para la producción de estrógenos en las células de la granulosa bajo la acción conjunta de la FSH. En el macho, la LH estimula a las células intersticiales de Leydig promoviendo la síntesis de testosterona, hormona indispensable para el mantenimiento de la espermatogénesis, el desarrollo del aparato reproductor y la expresión de los caracteres sexuales secundarios (Hafez y Hafez, 2000; Cunningham & Klein, 2014).

4.15.3 Prolactina

Según Cunningham y Klein (2014), la prolactina (PRL) es una hormona producida en la adenohipófisis con gran importancia en la reproducción, especialmente por su efecto sobre la glándula mamaria y el mantenimiento de la lactación en mamíferos. Aunque su secreción es pulsátil, el control de esta hormona se caracteriza principalmente por la

inhibición más que por la estimulación. Estos autores explican que, cuando se interrumpe la conexión entre la hipófisis y el hipotálamo ya sea por sección del tallo hipofisario o trasplante de la glándula a otra localización, la secreción de prolactina aumenta, lo que demuestra la relevancia de los factores inhibidores.

La dopamina, producida por neuronas hipotalámicas, constituye el principal factor inhibidor de la secreción de prolactina. En este control también participan otros mediadores inhibitorios, entre ellos el ácido γ-aminobutírico (GABA). La importancia de la regulación dopaminérgica se observa además en la acción de fármacos agonistas de la dopamina, como la bromocriptina y la cabergolina, capaces de disminuir la secreción de prolactina. En medicina veterinaria, esta propiedad permite utilizar estos compuestos para modificar determinadas respuestas reproductivas relacionadas con la actividad de esta hormona (Cunningham & Klein, 2014).

Entre los factores estimuladores destaca la hormona liberadora de tirotropina (TRH), aunque su papel fisiológico en la secreción de prolactina no está completamente esclarecido. También el péptido intestinal vasoactivo (VIP) puede favorecer su secreción al inhibir la síntesis de dopamina. Por otro lado, los estrógenos potencian la liberación de prolactina al reducir la sensibilidad de las células lactotropas a la dopamina y aumentar la densidad de receptores de TRH, hecho que explica la persistencia de la lactación incluso en perras sometidas a ovariohisterectomía.

Por su parte, García Sacristán (2018) señala que la función principal de la prolactina es la producción de leche en la hembra y subraya que su regulación difiere de la del resto de hormonas hipofisarias. La producción de PRL se encuentra mayoritariamente bajo control inhibitorio del hipotálamo, fundamentalmente a través de la dopamina liberada hacia el sistema porta hipotálamo-hipofisario. Este autor destaca que, cuando se interrumpe la conexión entre hipotálamo e hipófisis, la secreción de prolactina aumenta mientras que la del resto de hormonas adenohipofisarias disminuye, lo que confirma la dependencia de los mecanismos inhibitorios.

La propia prolactina participa en un mecanismo corto de retroalimentación negativa. Cuando aumenta su concentración sanguínea, favorece la actividad dopaminérgica hipotalámica y, como consecuencia, se limita posteriormente su secreción. Su regulación también puede recibir estímulos procedentes de factores liberadores de prolactina, entre los que se encuentran la TRH y el VIP. García Sacristán (2018) relaciona además la participación del VIP con neuronas hipotalámicas vinculadas a la secreción de oxitocina, estableciendo una posible coordinación entre ambas hormonas durante la lactación.

4.16 Hormonas neurohipofisiarias

4.16.1 Oxitocina

Según Vatti (1969), la oxitocina también llamada eutocina o pitocina es una sustancia secretada por la neurohipófisis junto con otras hormonas como la vasopresina y la adiuretina, con acciones presora y antidiurética, respectivamente. Su efecto principal se relaciona con la

contracción de la musculatura lisa, en especial la uterina al final de la gestación, lo que le confiere una acción ecbólica aunque no abortiva. Por esta razón, algunos autores no la consideran una hormona sexual propiamente dicha. Además, este autor señala que la oxitocina facilita el tránsito de los espermatozoides a lo largo del canal genital, tanto después de la cópula como tras la inseminación artificial.

Por su parte, García Sacristán (2018) amplía la visión sobre esta hormona indicando que en la hembra sus funciones más conocidas son estimular las contracciones de los conductos galactóforos para la eyección de la leche y promover las contracciones uterinas durante el coito y el parto. En el macho, la oxitocina parece estar vinculada a la eyaculación. Esta hormona es producida por neuronas del núcleo paraventricular del hipotálamo, desde donde es transportada por los axones hasta la neurohipófisis para liberarse directamente en la circulación sanguínea, sin pasar por el sistema porta hipofisario. El ejemplo clásico de un reflejo neuroendocrino que regula su liberación es el reflejo de mamar: los estímulos táctiles en la glándula mamaria viajan a través de vías sensoriales hasta el hipotálamo, desencadenando la secreción de oxitocina que, al llegar a las células mioepiteliales de los alveolos mamarios, provoca su contracción y la eyección de la leche.

Asimismo, este autor describe que durante la lactancia la liberación de oxitocina puede desencadenarse también por estímulos visuales o auditivos asociados a las crías o al entorno de ordeño, como ocurre en vacas lecheras que responden a la rutina y sonidos de la sala de ordeño. Finalmente, resalta que este sistema no depende de un mecanismo de retroalimentación negativa, sino que la acción de la hormona concluye

con su rápida metabolización, ya que posee una vida media muy corta, de apenas 1 a 3 minutos.

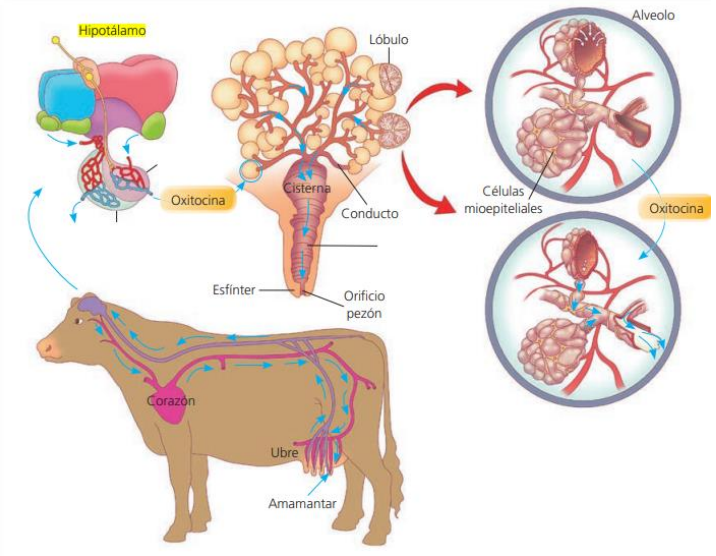


Figura 13. Esquema de la eyección de la leche.

Fuente: García Sacristán (2018).

4.17 Hormonas gonadales

Los ovarios y los testículos constituyen la principal fuente de hormonas gonadales, las cuales pertenecen predominantemente al grupo de los esteroides sexuales. No obstante, otros órganos como las glándulas suprarrenales y la placenta también contribuyen, en menor proporción, a la producción de esteroides reproductivos. Las hormonas gonadales se clasifican en cuatro grandes grupos: andrógenos, estrógenos, progestágenos y relaxina. Los tres primeros corresponden a hormonas esteroideas, mientras que la relaxina es una hormona de naturaleza

proteica. En la hembra, los ovarios secretan principalmente estradiol y progesterona, además de relaxina, mientras que en el macho los testículos producen fundamentalmente testosterona, hormona clave para el mantenimiento de la función reproductiva y los caracteres sexuales secundarios (Hafez y Hafez, 2000; Cunningham & Klein, 2014).

4.17.1 Estrógenos

Según Cunningham y Klein (2014), los estrógenos son hormonas esteroides esenciales para el desarrollo y funcionamiento del aparato reproductor femenino, producidas principalmente en los ovarios. Estas hormonas son responsables de la aparición de los caracteres sexuales secundarios durante la pubertad y, en hembras de animales domésticos, regulan el ciclo estral promoviendo la expresión del celo y la maduración folicular. Además, cumplen funciones clave en la preparación del útero para la implantación del embrión y en la estimulación de la secreción de mucus cervical, lo que favorece el transporte y la supervivencia de los espermatozoides. En bovinos y equinos, los signos de celo inducidos por los estrógenos como la conducta de monta entre hembras son fundamentales en los programas de inseminación artificial y sincronización de celo.

Por su parte, LibreTexts (2022) enfatiza que los estrógenos forman parte integral del eje hipotálamo-hipófisis-gonadal, donde regulan la liberación de gonadotropinas y contribuyen al mantenimiento del equilibrio hormonal indispensable no solo para la reproducción, sino también para otras funciones fisiológicas.

4.14.2. Progestágenos

Según Hafez y Hafez (2000), la progesterona es el progestágeno natural más importante y se produce principalmente en las células lúteas del cuerpo amarillo, así como en la placenta y en la glándula suprarrenal. Una vez secretada, circula en la sangre unida a globulinas transportadoras, al igual que los andrógenos y estrógenos. Su secreción depende de la estimulación ejercida por la hormona luteinizante (LH). Entre sus funciones fisiológicas destaca la preparación del endometrio para la implantación y el mantenimiento de la preñez, lo cual se logra mediante el aumento de la actividad secretora del endometrio y la reducción de la motilidad del miometrio. Además, la progesterona actúa en sinergia con los estrógenos para inducir el comportamiento estral, favorece el desarrollo del tejido secretor en las glándulas mamarias y, en concentraciones elevadas, inhibe tanto la manifestación del estro como la oleada ovulatoria de LH. En conjunto, estas acciones hacen de la progesterona una hormona fundamental en la regulación del ciclo estrual y en el establecimiento de la gestación.

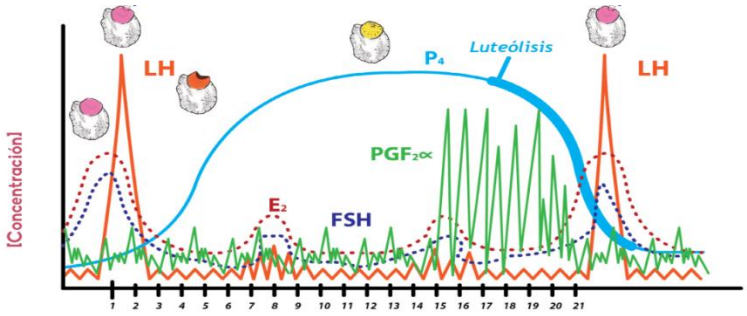


Figura 14. Principales hormonas del ciclo estral de la vaca.

Fuente: Lenis Sanín, F. (2014).

4.17.2 Andrógenos

Según Cunningham y Klein (2014), los andrógenos constituyen el grupo de esteroides sexuales responsables del desarrollo y mantenimiento de las características masculinas, siendo la testosterona el compuesto biológicamente más relevante en los mamíferos domésticos. Estos esteroides son producidos principalmente por las células de Leydig en los testículos, aunque también pueden sintetizarse en pequeñas cantidades en la corteza suprarrenal. La acción de la testosterona interviene desde la diferenciación sexual masculina y posteriormente participa en el desarrollo de los órganos genitales y de las glándulas sexuales accesorias. Su actividad también se relaciona con la manifestación del comportamiento sexual característico del macho (Cunningham & Klein, 2014).

McDonald (2012) relaciona la acción de los andrógenos con el mantenimiento de la espermatogénesis y con la función de las células de Sertoli, necesarias para proporcionar las condiciones adecuadas durante el desarrollo de las células germinales. Los efectos de estas hormonas no se limitan al aparato reproductor, ya que también participan en procesos relacionados con el desarrollo muscular, la formación de células sanguíneas y el crecimiento del tejido óseo (McDonald, 2012).

Finalmente, Senger (2012) señala que en la hembra los andrógenos también tienen relevancia fisiológica, ya que se producen en las células de la teca interna y sirven como sustrato para la aromatización a estradiol en las células de la granulosa. Por ello, forman parte integral del

mecanismo de dos células–dos gonadotropinas y resultan indispensables para la síntesis estrogénica durante la fase folicular.

4.17.3 Relaxina

La relaxina es una hormona polipeptídica cuya principal fuente es el cuerpo lúteo, aunque en diversas especies también puede ser secretada por la placenta y el útero. Hafez y Hafez (2000) relacionan su actividad con los cambios que experimenta el aparato reproductor antes del parto. Su acción favorece la modificación del tejido conectivo del cérvix, la vagina y los ligamentos pélvicos, facilitando la distensión de estas estructuras durante el nacimiento. También interviene en la regulación de la actividad del miometrio durante la gestación y, en asociación con los estrógenos, participa en el desarrollo de la glándula mamaria (Hafez & Hafez, 2000). Por su parte, Senger (2012) destaca que su acción sobre el tejido conectivo pélvico y la modulación del tono uterino resultan esenciales para facilitar el proceso de parto y la adaptación fisiológica de la hembra gestante.

4.14.5. Inhibinas

Las inhibinas son glucoproteínas producidas por las células de Sertoli en el macho y por las células de la granulosa en la hembra, y constituyen un componente esencial de la retroalimentación endocrina del sistema reproductor. Hafez y Hafez (2000) señalan que estas hormonas no esteroideas participan principalmente en el control de la secreción de FSH mediante un mecanismo de retroalimentación sobre la hipófisis. En la hembra, su producción se relaciona con la actividad de los folículos

en desarrollo y contribuye a la regulación de la respuesta folicular. En el macho, la inhibina producida por las células de Sertoli interviene en el control de FSH y refleja la actividad funcional del tejido seminífero (Hafez & Hafez, 2000). Su secreción ocurre predominantemente por vía linfática en el macho y venosa en la hembra, lo que subraya diferencias fisiológicas relevantes entre sexos.

4.17.4 Activinas

Las activinas son glicoproteínas producidas principalmente en las gónadas por las células de Sertoli en el macho y las células de la granulosa en la hembra, así como en la hipófisis y otros tejidos. Su función esencial es estimular la secreción de la hormona folículo-estimulante (FSH) y modular diversos procesos reproductivos. Hafez y Hafez (2000) describen a las activinas como parte de los mecanismos que favorecen la secreción de FSH y señalan su participación en procesos de crecimiento y diferenciación celular en las gónadas. Por su parte, Cunningham y Klein (2014) relacionan su actividad con diferentes procesos locales que intervienen en el funcionamiento ovárico y testicular. En este sistema de regulación, activinas e inhibinas ejercen efectos diferentes sobre la secreción de FSH, contribuyendo al control de la función gonadal (Hafez & Hafez, 2000; Cunningham & Klein, 2014).

4.17.5 Folistatina

Las folistatinas son proteínas fijadoras que se unen con alta afinidad a las activinas, neutralizando su efecto biológico. Según Senger (2012), la

folistatina actúa como un regulador local que limita la actividad de las activinas y, por lo tanto, reduce indirectamente la secreción de FSH. Cunningham y Klein (2014) explican que la folistatina se sintetiza principalmente en la hipófisis, pero también en tejidos periféricos, y juega un papel clave en la modulación de la función gonadal al controlar la disponibilidad de activinas en el microambiente folicular o testicular. Hafez y Hafez (2000) destacan que el equilibrio entre activinas, inhibinas y folistatinas es fundamental para mantener el patrón fisiológico de secreción de FSH y la dinámica normal de la gametogénesis.

4.17.6 Hormona antimülleriana.

Según Vera Esmeraldas, Marini, Mendoza y Zambrano Villacís (2022), en la hembra la hormona antimülleriana (AMH) es producida por las células de la granulosa de los folículos preantrales y antrales pequeños, disminuyendo su expresión en los folículos dominantes y siendo prácticamente indetectable en los folículos atrésicos o en los cuerpos lúteos.

La AMH guarda relación con la cantidad de folículos presentes en el ovario y, por esta razón, puede utilizarse como un indicador de la reserva folicular. Su participación en la foliculogénesis se relaciona con el control del reclutamiento de los folículos primordiales y con la respuesta folicular frente a la FSH. En bovinos, la determinación de sus concentraciones tiene aplicación en los programas de biotecnología reproductiva, debido a que proporciona información útil para valorar la población folicular y la posible respuesta de las hembras a tratamientos

de superovulación. Esto permite considerar la AMH como un criterio adicional para la selección de vacas donadoras de embriones (Vera Esmeraldas et al., 2022).

En los machos, la AMH es secretada por las células de Sertoli en los testículos fetales durante el desarrollo embrionario. Su función principal consiste en inducir la regresión de los conductos de Müller, evitando así la formación de estructuras reproductivas femeninas como el útero, las trompas de Falopio y parte de la vagina y permitiendo el desarrollo normal del aparato reproductor masculino.

4.18 Hormonas placentarias

La placenta es un órgano endocrino transitorio que secreta diversas hormonas con funciones reproductivas, ya sea idénticas o con actividad biológica semejante a las presentes en los mamíferos. Entre ellas se encuentran la gonadotropina coriónica equina (eCG), el lactógeno placentario y la proteína B (Hafez & Hafez, 2000).

4.18.1 Gonadotropina coriónica equina

También denominada gonadotropina sérica de yegua gestante (PMSG), es una glicoproteína secretada por las copas endometriales del útero equino entre los días 40 y 85 de la gestación. Esta hormona presenta actividad biológica similar a la de la hormona foliculoestimulante (FSH) y, en menor medida, a la hormona luteinizante (LH). Gracias a estas propiedades, la eCG se ha empleado de manera extensa en la inducción de la superovulación y en los protocolos de sincronización del celo en bovinos y otras especies domésticas (Ordóñez, s. f.).

4.18.2 Lactógeno placentario

El lactógeno placentario es una hormona polipeptídica, estructuralmente similar a la prolactina y a la hormona del crecimiento, producida por la placenta en varias especies de mamíferos. Su función principal es regular el desarrollo mamario y la lactancia, además de modificar el metabolismo materno para favorecer el aporte de nutrientes hacia el feto y garantizar su crecimiento. En bovinos lecheros, se ha descrito como un regulador clave en la fisiología reproductiva y en la preparación de la glándula mamaria para la lactación (Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM, s. f.; Hernández Cerón, 2016).

4.18.3 Proteína B

Las proteínas asociadas a la gestación (PAGs) son un grupo de glicoproteínas placentarias producidas por las células binucleadas del trofoblasto de rumiantes como vacas, cabras y ovejas. La proteína B o PAG-B es una de las primeras identificadas y se libera al torrente sanguíneo materno poco después de la implantación. Según Zoli et al. (1992) y Green et al. (2005), la PAG-B pertenece a la familia de las aspartil-proteasas, aunque carece de actividad enzimática; su función principal parece estar relacionada con la modulación inmunológica materna**,** contribuyendo a la tolerancia al concepto. Además, su presencia en sangre materna se usa ampliamente como biomarcador temprano de gestación en bovinos, debido a que sus concentraciones aumentan progresivamente durante el embarazo y disminuyen tras el parto. La PAG-B no actúa como una hormona clásica, pero sí cumple un papel endocrino-paracrino en la comunicación entre placenta y

madre, siendo esencial para el establecimiento y mantenimiento de la gestación.

4.18.4 Hormonas uterinas

Según Senger (2012), el útero actúa como un órgano endocrino que produce principalmente prostaglandinas, entre ellas la prostaglandina $F_2\alpha$ ($PGF_2\alpha$) como hormona uterina dominante y, en menor proporción, prostaglandina E_2 (PGE_2), ambas con funciones locales sobre el cuerpo lúteo y el miometrio. Estas sustancias, sintetizadas a partir del ácido araquidónico, regulan eventos reproductivos esenciales como la luteólisis, la motilidad uterina y los cambios necesarios para el parto y el posparto. Su acción es predominantemente paracrina o autocrina, actuando directamente sobre tejidos vecinos.

4.18.5 Prostaglandinas

Las prostaglandinas son lípidos biológicamente activos derivados del ácido araquidónico mediante la acción de la enzima ciclooxigenasa (COX-1 y COX-2). Forman parte del grupo de los eicosanoides y se sintetizan localmente en casi todos los tejidos del organismo, actuando de manera paracrina o autocrina. Estas moléculas cumplen funciones fisiológicas esenciales en animales, como la regulación de los procesos inflamatorios, la modulación de la presión arterial, la termorregulación, la secreción gástrica, además de su papel clave en la reproducción (Senger, 2012).

Dentro del ámbito reproductivo, la prostaglandina F2α (PGF2α) es la más relevante. Es producida principalmente por el endometrio uterino en hembras cíclicas y su función primordial es la luteólisis, es decir, la regresión del cuerpo lúteo. Este proceso es indispensable para permitir el inicio de un nuevo ciclo estral cuando no se produce la fecundación. Asimismo, las prostaglandinas participan en la contracción del músculo liso uterino, facilitando tanto el parto como la expulsión de fluidos uterinos posparto (Senger, 2012).

4.19 Actividad autónoma

4.19.1 Descripción de la actividad

El lector realizará una revisión analítica del sistema endocrino aplicado a la reproducción, enfocándose en la organización funcional del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas, el origen y función de las principales hormonas reproductivas y los mecanismos de retroalimentación que regulan el ciclo estral y la espermatogénesis.

4.19.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar la actividad, el estudiante:

- Identifica y explica la función de las principales hormonas involucradas en la reproducción animal.
- Comprende la interacción entre hipotálamo, hipófisis y gónadas en la regulación del ciclo estral y la espermatogénesis.
- Distingue los tipos de señalización hormonal y los mecanismos de retroalimentación que controlan la secreción endocrina.

- Analiza la acción de las hormonas esteroideas y peptídicas a nivel celular.
- Integra la fisiología endocrina en un modelo conceptual aplicable a la reproducción animal.

4.19.3 Autoevaluación Capítulo IV

1. ¿Cuál es la función principal de la GnRH?

a. Inhibir la secreción de prolactina
b. Estimular la producción de progesterona
c. Inducir la liberación de FSH y LH desde la adenohipófisis
d. Activar directamente los folículos ováricos

2. ¿Dónde se producen principalmente los andrógenos?

a. Granulosa
b. Células de Sertoli
c. Células de Leydig
d. Hipófisis anterior

3. ¿Qué hormona es responsable de la luteólisis en hembras cíclicas?

a. Estradiol
b. $PGF_{2}\alpha$
c. Oxitocina
d. AMH

4. La secreción pulsátil de GnRH tiene como consecuencia directa:

a. La inhibición sostenida de LH

b. La liberación periódica de FSH y LH

c. El aumento de progesterona

d. La supresión de estrógenos

5. ¿Cuál es la principal función de la AMH en hembras adultas?

a. Estimular la ovulación

b. Aumentar la luteinización

c. Regular el reclutamiento de folículos primordiales

d. Inducir la regresión del cuerpo lúteo

6. ¿Qué hormona se caracteriza por poseer receptores intracelulares porque atraviesa la membrana plasmática?

a. Insulina

b. LH

c. Progesterona

d. Prolactina

7. La inhibina secretada por las gónadas ejerce principalmente un efecto sobre:

a. La secreción de LH

b. La liberación de oxitocina

c. La disminución de FSH

d. La síntesis de progesterona

8. ¿Cuál de las siguientes hormonas se libera desde la neurohipófisis?

a. FSH

b. ACTH

c. Oxitocina

d. Estradiol

9. ¿Qué tipo de señalización requiere contacto directo entre células adyacentes?

a. Endocrina

b. Paracrina

c. Autocrina

d. Yuxtacrina

10. ¿Cuál es una función reproductiva de la testosterona en el macho?

a. Estimula la ovulación

b. Induce la luteólisis

c. Desarrolla las glándulas accesorias y mantiene la espermatogénesis

d. Favorece la implantación

CAPÍTULO V

5 CICLO ESTRAL

5.1 Resumen

Durante el ciclo estral se presentan cambios hormonales que acompañan las fases de proestro, estro, metaestro y diestro y participan en eventos como la ovulación y la preparación del útero ante una posible gestación. La duración y las características de este ciclo no son iguales en todas las especies domésticas y pueden estar condicionadas por factores genéticos, ambientales, nutricionales y de manejo. Estos factores también pueden influir en el momento en que se alcanza la pubertad y en la manifestación del celo. Comprender estas variaciones es esencial para optimizar programas reproductivos en producción animal.

5.2 Objetivos de aprendizaje

- Describir la regulación endocrina de la pubertad y del ciclo estral en las especies domésticas.
- Diferenciar entre especies las características y la duración de las distintas fases del ciclo estral.
- Analizar la influencia de los factores genéticos, ambientales y nutricionales sobre el inicio de la pubertad y la manifestación del celo.

5.3 Introducción

El ciclo estral comprende una serie de cambios fisiológicos que se presentan de manera periódica en la hembra y que involucran la actividad del hipotálamo, la hipófisis, los ovarios y el tracto reproductor. Arthur, Noakes y Pearson (1996) relacionan estos cambios con la actividad cíclica del ovario y con la acción de las gonadotropinas y los esteroides sexuales, que intervienen en el desarrollo folicular y la ovulación. La duración y presentación del ciclo no son iguales en todas las especies; Hurnik et al. (1994) señalan que factores ambientales, entre ellos el fotoperíodo y la temperatura, pueden modificar su periodicidad. Durante este proceso también se producen cambios en el ovario y el útero vinculados con la función reproductiva de la hembra (Sisson & Grossman, 1999). Estas particularidades permiten reconocer diferentes patrones de actividad reproductiva entre las especies domésticas.

5.4 Madurez sexual

Cuando nacen los animales domésticos el aparato genital a alcanzado casi el desarrollo morfológico, pero no el funcional que va madurando gradualmente en un periodo de aumento de volumen o “fase de crecimiento”; queda inactivo hasta el momento que se inicia la función reproductora o fase de “madurez sexual” o pubertad, por una actividad endocrina hipofisiaria especial que ya es potencial en la vida intrauterina y que encuentra luego su correlación en una actividad hormonal de las glándulas sexuales inmaduras.

5.4.1 Pubertad

La pubertad en los animales se define como el proceso fisiológico mediante el cual los individuos adquieren la capacidad reproductiva, es decir, la habilidad para producir gametos viables y manifestar comportamientos sexuales propios de la especie. Este proceso depende de la maduración del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas, que posibilita la secreción pulsátil de GnRH, y, en consecuencia, la liberación de LH y FSH. Dichas gonadotropinas estimulan el desarrollo folicular en hembras y la espermatogénesis en machos. La pubertad no constituye un evento aislado, sino una secuencia de cambios endocrinos, morfológicos y conductuales que marcan la transición del estado juvenil al reproductivo (Senger, 2012).

La edad de presentación varía según la especie, raza, nutrición, entorno y estado fisiológico del animal. En equinos, la pubertad aparece entre los 20 y 24 meses; en la vaca criada en libertad alrededor del vigésimo mes, mientras que en razas lecheras estabuladas puede presentarse entre los 11 y 16 meses. En la camella ocurre aproximadamente a los tres años. En pequeños rumiantes y especies monogástricas se observa entre los 7 y 12 meses (oveja, cabra, cerda, perra y gata), y en la coneja entre los 4 y 6 meses. Estos rangos son amplios y están sujetos a variaciones influenciadas por la alimentación, el clima, la estación, la raza, los sistemas de crianza, los cruzamientos y el estado sanitario. Se reportan casos excepcionales, como el de una vaca que quedó gestante a los tres meses de edad y parió a los 364 días de vida (Vatti, 1969).

Tabla 4. Edad aproximada de la pubertad en especies domésticas.

Bovina	8-12meses	Influenciada por raza, nutrición y fotoperíodo
Ovina	5-7meses	Las razas precoces pueden ciclar a los 4 meses
Caprina	5-7meses	Más temprana en razas lecheras
Equina	12-24 meses	Potro hembra suele ciclar a los 12-18meses
Porcina	5-7 meses	Alcanzan pubertad según peso y condición corporal
Perra	6-24 meses	Razas pequeñas maduran antes que las grandes
Gata	5- 9meses	Influenciada por fotoperíodo y peso corporal

Fuente: Adaptado de Senger (2012); Hafez y Hafez (2000); Noakes et al. (2018); Cunningham (2014); Johnston et al. (2001); Concannon (2009).

5.5 Factores que influyen en la edad de pubertad

La edad a la pubertad en los animales domésticos no depende únicamente del tiempo cronológico, sino de la interacción entre factores genéticos, ambientales, nutricionales y sociales. Según Hafez y Hafez (2000), la pubertad se manifiesta cuando el individuo alcanza un desarrollo corporal mínimo y cuando el eje hipotálamo–hipófisis–gónadas adquiere la madurez funcional necesaria para producir gametos y hormonas sexuales de manera coordinada.

Entre los factores relacionados con el inicio de la pubertad se encuentra la genética, debido a que existen diferencias de precocidad entre razas; algunas líneas ovinas y caprinas de carne, por ejemplo, pueden iniciar

su actividad reproductiva antes que otras consideradas más tardías. La condición nutricional también interviene en este proceso. Las deficiencias de energía o proteína pueden retrasar el crecimiento y reducir la frecuencia de los pulsos de GnRH, mientras que una alimentación equilibrada favorece que el animal alcance el peso corporal necesario para el inicio de la actividad reproductiva. Un crecimiento excesivamente acelerado, por otra parte, puede ocasionar alteraciones en la maduración folicular o espermatogénica.

En las especies con reproducción estacional, las condiciones ambientales y particularmente el fotoperíodo tienen una participación importante. En ovejas, cabras y gatas, los cambios en la duración del día modifican la secreción de melatonina y, a través de esta respuesta, intervienen en el inicio de la ciclicidad ovárica. El entorno social también puede modificar la presentación de la pubertad. La presencia del macho, por ejemplo, puede adelantarla mediante estímulos feromonales relacionados con un aumento en la secreción pulsátil de GnRH.

El estado sanitario y las condiciones de manejo también pueden influir en la edad puberal. Las enfermedades parasitarias, el estrés térmico, las carencias minerales o un manejo inadecuado pueden limitar el crecimiento y retrasar la maduración reproductiva. La interacción de estos factores contribuye a explicar las diferencias observadas entre individuos y debe considerarse al establecer el momento del primer servicio.

5.6 Ciclo estral

La regulación de estos cambios depende principalmente de la actividad coordinada del eje hipotálamo–hipófisis–gónadas. Durante el ciclo se reconocen cuatro fases: proestro, estro, metaestro y diestro. Una de sus características es la ausencia de menstruación, a diferencia de lo que ocurre en el ciclo menstrual humano. El estro corresponde al periodo en el que la hembra manifiesta receptividad sexual y, en varias especies domésticas, se encuentra estrechamente relacionado con el momento de la ovulación.

Aunque vacas, yeguas, cerdas, cabras y ovejas presentan esta actividad cíclica, existen diferencias en su duración. En bovinos, caprinos y porcinos el ciclo tiene una duración aproximada de 21 días; en ovinos es de alrededor de 17 días y en la yegua se aproxima igualmente a los 21 días.

5.7 Fases del ciclo estral

5.5.1. Proestro

Según Lenis Sanín (2014), el proestro es la primera fase del ciclo estral y se caracteriza por el incremento progresivo en los niveles de estradiol (E2) producidos por el folículo dominante en desarrollo. Esta etapa tiene una duración aproximada de 3 a 5 días en la vaca.

El autor señala que durante este período el útero adquiere una consistencia semitónica, mientras que a nivel ovárico se observa un

folículo dominante en crecimiento y un cuerpo lúteo en regresión, lo que permite el predominio de la actividad estrogénica.

5.5.2. Estro

Es la etapa del ciclo estral, caracterizada por la receptividad de la hembra hacia el macho, permitiendo la monta. En esta etapa, los niveles sanguíneos de E2 producidos por el folículo preovulatorio, llegan a su máxima concentración. Tiene una duración entre 12 y 18 horas; sin embargo, este tiempo dependerá de factores como la raza, la edad, el clima, el manejo, y la nutrición.

En el útero aumenta la producción de moco, preparando el tracto reproductivo para la monta. Se aumenta la síntesis de proteínas contráctiles en el miometrio, lo que hace que el útero esté tónico. El endometrio se encuentra en una etapa proliferativa debido, entre otras cosas, a un efecto vasodilatador de los E2. Los ovarios presentan un folículo dominante que produce altas concentraciones de E2.



Figura 15. Vaca en celo.

Fuente: Elaboración propia

5.7.1 Metaestro

Es la etapa del ciclo estral que se presenta después del estro, y se caracteriza porque se da la ovulación del folículo preovulatorio o dominante. En esta etapa, los niveles de E2 disminuyen, y comienza a aumentar la producción de P4. Dura aproximadamente de 2 a 5 días.

El útero pierde la tonicidad y se presenta un leve edema uterino, con actividad secretora de las glándulas endometriales.

En los ovarios comienza la fase lútea con el cuerpo hemorrágico. Simultáneamente, comienza a emerger una nueva cohorte folicular.

5.7.2 Diestro

El diestro es la etapa del ciclo estral caracterizada por la presencia de un cuerpo lúteo funcional, el cual es responsable de aumentar los niveles sanguíneos de P4 al máximo, con el fin de mantener una eventual gestación. Si la vaca queda gestante, el cuerpo lúteo permanecerá funcional hasta unos días antes de finalizar la gestación; de lo contrario, el cuerpo lúteo sufrirá lisis por acción de la prostaglandina F2α (PGF2α), entre los días 15 y 17 del ciclo, dando fin a esta fase. La duración de esta etapa es de aproximadamente 10 a 12 días.

El útero se encuentra flácido, si no está gestante, y grávido si hay gestación. Los ovarios presentan un cuerpo lúteo funcional.



Figura 16. Presencia de cuerpo lúteo.

Fuente: Elaboración propia.

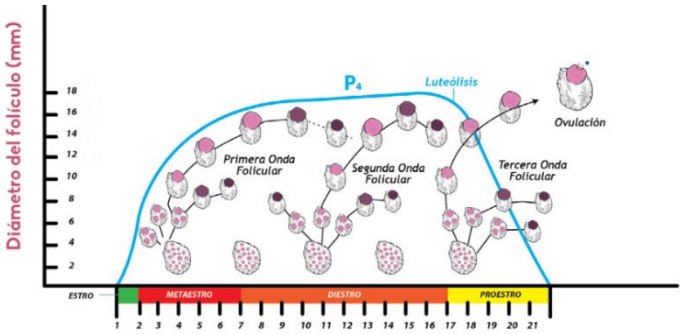


Figura 17. Ciclo estral de la hembra bovina.

Fuente: Lenis Sanín, 2014.

Tabla 5. Parámetros reproductivos del ciclo estral en especies domésticas.

Especie	Duración del ciclo estral	Tipo de ciclo	Duración del estro	Ovulación	Fuente
Bovina	18-24 días (promedio 21)	Policíclica continua	12-18 horas	24-32 h post-estro	Senger (2012)
Ovina	14- 19 días	policíclica estacional (otoño)	24 -36 horas	Cerca del final del estro	Hafez & Hafez (2000)
Caprina	18- 22 días	policíclica estacional (otoño)	12 - 48 horas	Últimas horas del estro	Hafez & Hafez (2000)
Equina	19- 22 días	policíclica estacional (primavera -verano)	5-7 días	24-48 h antes del final del estro	Noakes et al. (2018)
Porcina	18- 24 días	policíclica continua	2-3 días	36-44 h post inicio del estro	Cunningham (2014)

Perra	6- 7 meses (variable)	Monoéstrica no estacional	7 -10 días	2-3 días post-ovulación hormonal (LH)	Johnston et al. (2001)
Gata	14- 28 días	Poliéstrica estacional (primavera-verano)	2-6 días	Incluida por cópula (8-12horas después)	Concannon (2009)

Fuente: Adaptado de Senger (2012); Hafez y Hafez (2000); Noakes et al. (2018); Cunningham (2014); Johnston et al. (2001); Concannon (2009).

5.8 Actividad autónoma

5.8.1 Descripción de la actividad

El lector revisará los contenidos desarrollados en el capítulo y elaborará un cuadro comparativo sobre la pubertad y el ciclo estral en las especies domésticas estudiadas. En el cuadro deberá considerar la edad de presentación de la pubertad, los factores que pueden modificar su aparición y las principales diferencias que se presentan durante las fases del ciclo estral. Como complemento, resolverá un cuestionario relacionado con los aspectos endocrinos, fisiológicos y conductuales abordados en el capítulo.

La actividad permitirá relacionar las diferencias reproductivas entre especies con factores como la nutrición, el ambiente y las condiciones de manejo, y valorar su influencia sobre el comportamiento reproductivo de los animales dentro de los sistemas de producción.

5.8.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar la actividad, el lector será capaz de explicar los procesos de madurez sexual, pubertad y ciclo estral en especies domésticas, analizando sus variaciones fisiológicas y los factores que influyen en su presentación, para aplicarlos en el manejo reproductivo de animales de producción y compañía.”

5.8.3 Autoevaluación Capítulo V

1. La pubertad se define como el momento en que el animal:

a) Presenta su primer celo visible
b) Manifiesta interés sexual hacia el macho
c) Adquiere la capacidad de producir gametos viables y reproducirse
d) Completa el desarrollo corporal adulto

2. ¿Cuál eje endocrino es fundamental para el inicio de la pubertad?

a) Hipotálamo–tiroides–ovarios
b) Hipotálamo–hipófisis–gónadas
c) Corteza–adenohipófisis–médula
d) Páncreas–hígado–gónadas

3. ¿Qué hormona incrementa su pulsatilidad para iniciar la pubertad?

a) Progesterona
b) Estradiol

c) GnRH

d) Prolactina

4. Uno de los factores más importantes que adelanta la pubertad en hembras es:

a) Deficiencia proteica

b) Alto nivel de estrés

c) Alcanzar un peso corporal mínimo adecuado

d) Ambientes muy fríos

5. En especies estacionales como ovejas y cabras, el inicio de la pubertad está altamente influenciado por:

a) El nivel de calcio en la dieta

b) El fotoperíodo

c) El tamaño corporal únicamente

d) La presencia de otras hembras

6. ¿Qué fase del ciclo estral se caracteriza por la receptividad al macho?

a) Proestro

b) Estro

c) Metaestro

d) Diestro

7. En el diestro, la hormona predominante es:

a) Estradiol

b) GnRH

c) Progesterona

d) Prostaglandina F2α

8. ¿Qué evento ocurre típicamente en el metaestro?

a) Máximo pico de estradiol

b) Ovulación y formación del cuerpo hemorrágico

c) Receptividad sexual

d) Luteólisis

9. La perra se diferencia de otras especies domésticas porque su ciclo estral es:

a) Poliéstrico continuo

b) Poliéstrico estacional

c) Monoestrico no estacional

d) Intermitente según la nutrición

10. ¿En qué especie la ovulación depende del estímulo de la cópula?

a) Vaca

b) Cerda

c) Yegua

d) Gata

CAPÍTULO VI

6 DINÁMICA FOLICULAR Y FOLICULOGÉNESIS

6.1 Resumen

La dinámica folicular en bovinos se caracteriza por el crecimiento y regresión secuencial de ondas foliculares durante el ciclo estral. Al comienzo de cada onda se desarrolla un grupo de folículos antrales, de los cuales uno adquiere la dominancia y continúa creciendo en respuesta a la acción de FSH y LH. A medida que este folículo se desarrolla, la producción de estradiol e inhibina contribuye a limitar el crecimiento de los folículos restantes. El destino del folículo dominante está relacionado con las concentraciones de progesterona presentes en ese momento del ciclo. Cuando estas permanecen elevadas, el folículo no llega a ovular y posteriormente entra en atresia; en cambio, al disminuir la progesterona, el folículo preovulatorio puede responder al pico de LH y producirse la ovulación. En la vaca suelen presentarse dos o tres ondas foliculares durante un ciclo estral, con variaciones relacionadas con la raza y el estado fisiológico. La sucesión de estas ondas y los cambios hormonales que las acompañan permiten comprender cómo se desarrolla la actividad folicular hasta alcanzar la ovulación.

6.2 Objetivos de aprendizaje

- Identificar los cambios que experimentan los folículos durante las etapas de reclutamiento, selección y dominancia en las ondas foliculares del ciclo estral bovino.

- Explicar la participación de FSH, LH, estradiol, inhibina y progesterona en el crecimiento, dominancia y atresia de los folículos ováricos.

- Relacionar la dinámica de las ondas foliculares con la ovulación, la fertilidad y la aplicación de protocolos de sincronización en bovinos.

6.3 Introducción

La dinámica folicular en bovinos describe el patrón cíclico de crecimiento y regresión de los folículos ováricos durante el ciclo estral y ha sido ampliamente estudiada por autores como Ginther y colaboradores, quienes demostraron la existencia de ondas foliculares bien definidas en la vaca (Ginther et al., 1989; 1996). Cada ciclo puede presentar dos o tres ondas de crecimiento folicular, dependiendo de factores como raza, edad y estado fisiológico (Senger, 2012). Estas ondas se originan bajo el control del eje hipotálamo–hipófisis–ovario, mediante la liberación pulsátil de GnRH y la secreción de FSH y LH (Cunningham, 2014). El desarrollo y la selección del folículo dominante están estrechamente ligados a la concentración de estradiol, inhibina y progesterona circulantes, lo que determina si el folículo alcanzará la ovulación o entrará en atresia (Wiltbank et al., 2002). Comprender estos procesos es fundamental para el diseño de protocolos de sincronización del estro y ovulación, así como para interpretar las variaciones en la fertilidad observadas en los programas reproductivos bovinos modernos.

6.4 Foliculogénesis

Según Gasque Gómez (2008), al nacer una becerra posee entre 50 000 y 200 000 ovocitos por ovario, aunque hacia los dos años la mayoría ha involucionado y permanecen alrededor de 5000. A lo largo de la vida reproductiva solo una mínima fracción entre 5 y 10 por ciclo alcanzará la ovulación y potencial fecundación. El ovocito se desarrolla dentro del folículo bajo la influencia de la FSH hipofisaria. En bovinos y ovinos este crecimiento ocurre en ***ondas foliculares***, generándose típicamente 2–3 ondas por ciclo en bovinos y 3–4 en ovinos, estimuladas por incrementos transitorios de FSH que promueven la proliferación de células de la granulosa, la síntesis de estradiol y la expresión de receptores de LH (Ryan et al., 2008). La foliculogénesis comienza durante la vida fetal y continúa a través de las etapas prepuberal, puberal, anestro posparto, ciclo estral y primeros meses de gestación, caracterizándose por acelerados procesos de proliferación y diferenciación que llevan a la formación de folículos preovulatorios a partir de folículos primordiales (Henao & Trujillo, 2000; Palma, 2001).

6.4.1 Crecimiento folicular

Según Albarracín (2005), al momento del nacimiento los ovocitos de los mamíferos permanecen bloqueados en la profase de la primera división meiótica (fase G2) y requieren reiniciar y completar la meiosis para que la fecundación ocurra. La capacidad para retomar y culminar este proceso, conocida como *competencia meiótica*, se adquiere progresivamente a lo largo del crecimiento folicular y está relacionada con cambios tanto nucleares como citoplasmáticos. En este contexto,

durante la maduración nuclear se observa la ruptura de la vesícula germinal, la condensación cromosómica, la progresión hasta metafase I, la extrusión del primer corpúsculo polar y el posterior bloqueo en metafase II. A nivel citoplasmático, ocurre una reorganización de organelos, síntesis de proteínas específicas y la activación de cascadas de señalización intracelular mediadas por factores como el *metaphase promoting factor* (MPF), la familia de *mitogen-activated protein kinases* (MAPK), el factor citostático (CSF), el AMPc y el receptor del *epidermal growth factor* (EGFR).

El mismo autor explica que el crecimiento y maduración folicular constituyen una serie de transformaciones moleculares y subcelulares que afectan al ovocito, la granulosa y la teca, procesos regulados tanto por factores intraováricos como por señales gonadotrópicas. La producción de estradiol es determinante, ya que permite al folículo dominante adquirir receptores de LH indispensables para la ovulación y la luteinización; en contraste, una respuesta inadecuada de la granulosa y la teca a dichas señales conduce a la atresia folicular (Albarracín, 2005).

Por su parte, Adamiak et al. (2006, citado por Fouladi et al., 2007) sostienen que las señales metabólicas y endocrinas que controlan el crecimiento folicular también influyen en la calidad de los ovocitos. Dichas señales pueden actuar modificando las concentraciones de hormonas o factores de crecimiento en el fluido folicular, o a través de la interacción directa entre células de la granulosa y el ovocito. Incluso, variaciones a corto plazo en la ingesta energética de la dieta afectan la morfología y el potencial de desarrollo de los ovocitos.

Asimismo, Thatcher et al. (2003, citado por Fouladi et al., 2007) destacan el papel de los ácidos grasos como fuente de energía y como componentes estructurales de membranas biológicas. Su aporte dietético no solo mejora el balance energético, sino que también ejerce efectos directos sobre procesos reproductivos, favoreciendo la competencia ovocitaria y la capacidad de desarrollo embrionario.

6.4.2 Composición lipídica del ovocito y líquido folicular

Los ovocitos bovinos y porcinos se caracterizan por poseer una elevada concentración de lípidos, especialmente ácidos grasos. En bovinos, un ovocito inmaduro contiene aproximadamente *63 µg de lípidos totales*, de los cuales cerca del *25% corresponde a fosfolípidos*, mientras que los *ácidos grasos saturados representan menos del 30%* (McEvoy et al., 2000, citado por Fouladi et al., 2007).

En el líquido folicular también se observan variaciones importantes según el desarrollo del folículo. El *ácido linoleico* disminuye conforme aumenta el diámetro folicular:

- Folículos pequeños: 34,8%
- Folículos grandes: 31,1%

Este patrón evidencia una *correlación inversa entre el tamaño folicular y la concentración de ácido linoleico* (Zeron et al., 2001, citado por Fouladi et al., 2007).

Adicionalmente, se han descrito *cambios estacionales* tanto en la composición lipídica como en la competencia del ovocito, posiblemente

asociados a *variaciones ambientales* (temperatura) y al *perfil nutricional* de la hembra.

Los lípidos ovocitarios cumplen un papel fundamental durante la maduración y el desarrollo temprano del embrión, ya que actúan como *principal fuente de energía* en estas etapas (Kim et al., 2001, citado por Fouladi et al., 2007).

6.4.3 Bloqueo mitótico y reinicio de la meiosis

De acuerdo con Albarracín (2005), el pico preovulatorio de LH es el responsable de liberar al ovocito de su primer bloqueo meiótico, conduciéndolo a la metafase II (MII), que constituye el segundo bloqueo. Este proceso se conoce como *maduración ovocitaria* y marca el punto en el que el ovocito está listo para la ovulación y la fecundación. Tras la fecundación, la activación del ovocito provoca la salida definitiva del segundo bloqueo meiótico, permitiendo la continuación del desarrollo embrionario.

Por su parte, Henao y colaboradores (2000) señalan que durante el ciclo estral del bovino se producen cambios morfológicos evidentes en el ovario. Cerca del estro, el folículo ovulatorio alcanza un tamaño considerable y secreta grandes cantidades de estradiol, lo que induce el pico preovulatorio de LH. En este momento emerge una nueva onda folicular, constituida por un grupo de folículos pequeños en crecimiento, de los cuales únicamente uno es seleccionado para continuar su desarrollo, mientras los demás entran en atresia.

Los mismos autores enfatizan que el folículo ovárico funciona como una unidad fisiológica regulada tanto por gonadotropinas como por un complejo sistema de interacciones intraováricas. En bovinos, el crecimiento folicular ocurre en forma de ondas, integradas por cohortes de folículos reclutados a partir de la reserva en reposo. Dentro de cada cohorte se establece una competencia por la dominancia, en la que solo un folículo logra mantener su crecimiento aún en condiciones de bajas gonadotropinas. Este folículo dominante ejerce un control inhibitorio sobre sus compañeros de cohorte —los folículos subordinados a través de la secreción de factores endocrinos, autocrinos y paracrinos, que potencian su propio desarrollo y aceleran la atresia de los demás (Henao & Col., 2000).

6.4.4 Dinámica folicular en rumiantes

Driancourt (1991) describió que la dinámica folicular en rumiantes se caracteriza por ondas sucesivas de crecimiento y regresión, un patrón claramente observado en bovinos, ovinos y caprinos. En ovejas y cabras, el autor reportó que el ciclo suele presentar más ondas que en bovinos debido a la estacionalidad reproductiva y a la duración más corta del ciclo estral. En el caso de los caprinos, Bartlewski et al. (1999) documentaron que las cabras presentan entre 3 y 4 ondas foliculares por ciclo, con un folículo dominante que inhibe a los subordinados a través de estradiol e inhibina. En búfalas, Baruselli et al. (1997) demostraron que la especie presenta dos o tres ondas similares a las vacas, pero con mayor incidencia de anestro estacional. Adicionalmente, Rao y Madan (1997) indicaron que la mayor variabilidad en la duración del ciclo y la

sensibilidad ambiental de las búfalas afectan el desarrollo y destino del folículo dominante, el cual ovula o entra en atresia según el ambiente endocrino predominante.

6.5 Dinámica folicular en otras especies domésticas

En la cerda, la dinámica folicular se caracteriza por un crecimiento continuo de cohortes foliculares durante el ciclo estral, aunque no se describen ondas tan definidas como en los rumiantes; los folículos crecen de manera progresiva hasta que un grupo alcanza la ovulación bajo el aumento de LH (Britt et al., 1990). En la yegua, la dinámica es distinta: durante la estación reproductiva se desarrollan ondas foliculares mayores y menores, pero solo una de ellas genera el folículo ovulatorio, mientras que las demás experimentan atresia bajo la regulación de FSH y LH (Ginther, 1992). Estas diferencias interespecie reflejan adaptaciones fisiológicas particulares relacionadas con el tipo de ciclo estral y la estrategia reproductiva de cada especie.

En las perras, la dinámica folicular no sigue un patrón ondulatorio clásico como en los ungulados, ya que su ciclo estral es prolongado y la fase folicular ocurre solo una o dos veces al año. Durante el proestro y el estro, los folículos crecen de manera sostenida y alcanzan la ovulación sin la presencia de ondas repetitivas, en un modelo único dentro de las especies domésticas (Johnston et al., 2001). En contraste, la gata presenta actividad folicular continua durante la temporada reproductiva, con crecimiento repetitivo de folículos que pueden llegar a ovular únicamente si existe estímulo copulatorio, dado que es una especie ovuladora inducida (Concannon, 2009). Este patrón repetitivo pero no

cíclico en gatas y el patrón único y prolongado de las perras evidencian que la dinámica folicular en mascotas difiere marcadamente de la observada en los grandes herbívoros domésticos.

6.6 Reclutamiento folicular

Es el proceso mediante el cual un grupo inicial de folículos antrales pequeños es estimulado para ingresar a una fase de crecimiento coordinado. Este evento constituye la primera etapa de cada ola folicular, y depende en gran medida del aumento transitorio de la hormona FSH, cuya liberación permite que una cohorte de folículos sensibles inicie su desarrollo (Ginther et al., 2001; Adams et al., 2008). A diferencia del crecimiento lento y prolongado de los folículos preantrales, el reclutamiento corresponde a una fase dinámicamente más rápida y estrechamente regulada por señales endocrinas e intraováricas.

La respuesta de los folículos durante esta etapa no está determinada exclusivamente por la FSH. También participan factores locales originados en las células de la granulosa, la teca y el propio ovocito. Entre ellos se encuentran GDF-9, BMP-15, inhibina, activina, IGF-I, kit ligand y prostaglandinas, cuya acción interviene en la sensibilidad de los folículos frente a la FSH y, por tanto, en su respuesta durante el reclutamiento (Fortune, 2003; Webb et al., 2007). El inicio del crecimiento folicular depende así de la participación conjunta de señales endocrinas y de mecanismos locales dentro del ovario.

Durante el reclutamiento, todos los folículos de la cohorte muestran un incremento en proliferación de células de la granulosa y expansión de la

teca interna. Sin embargo, conforme avanzan los días, comienzan a divergir en su capacidad para continuar creciendo. Este diferencial de crecimiento se explica por variaciones en la expresión de receptores de FSH y LH, la capacidad para producir estradiol y la competencia para mantener el desarrollo aun cuando los niveles de FSH disminuyen durante la transición hacia la selección (Evans, 2003; Scaramuzzi et al., 2011).

En especies monotocas como el bovino, el reclutamiento ocurre típicamente dos o tres veces por ciclo estral, iniciando cada ola con folículos de aproximadamente 3–4 mm de diámetro. En especies politocas, como cerdas y ovejas, se reclutan múltiples folículos que podrán ovular simultáneamente (Ginther, 2014). No obstante, independientemente de la especie, el reclutamiento establece el punto de partida sobre el cual se definirá la selección y posterior dominancia.

En conjunto, el reclutamiento folicular es un proceso altamente regulado que marca el inicio de cada fase ovárica activa, integrando señales endocrinas, factores de crecimiento, moduladores intraováricos y la propia competencia intrínseca del folículo para continuar su desarrollo.

6.6.1 Selección y divergencia del folículo

La selección folicular constituye el proceso mediante el cual un folículo dentro de la cohorte reclutada adquiere la capacidad de continuar creciendo aun cuando las concentraciones plasmáticas de FSH comienzan a disminuir.

Ryan y colaboradores (2008) describen diferencias entre los folículos que adquieren la dominancia y aquellos que permanecen como subordinados. Durante este proceso, el folículo dominante continúa su desarrollo mientras los demás integrantes de la cohorte reducen progresivamente su crecimiento. La disminución de FSH contribuye a esta diferenciación, debido a que los folículos subordinados mantienen una mayor dependencia de esta hormona. En el folículo dominante, por el contrario, aumenta la participación de LH, lo que favorece la continuidad de su desarrollo. A nivel intracelular, Ryan y colaboradores (2008) señalan la participación de las vías Akt y Erk en el desarrollo folicular y muestran diferencias en su actividad entre folículos dominantes y subordinados.

La divergencia no sigue necesariamente el mismo patrón en todos los ciclos. Henao y colaboradores (2000) describen situaciones en las que la diferencia de diámetro entre el folículo dominante y el subordinado aumenta progresivamente durante los primeros días de la onda. En otros casos, ambos mantienen dimensiones semejantes hasta que se establece la divergencia. También puede ocurrir que un folículo inicialmente mayor no llegue a adquirir la dominancia debido a que posteriormente presenta una menor velocidad de crecimiento. La revisión de Henao y Trujillo (2000) está dedicada específicamente al establecimiento y desarrollo de la dominancia folicular bovina.

Estos autores señalan además que la FSH actúa en conjunto con los estrógenos para acelerar el crecimiento temprano de los folículos, mientras que incrementos modestos de FSH permiten el reclutamiento inicial de la cohorte en el día cero de cada onda folicular.

Por su parte, Adams y colaboradores (2008) señalan que la emergencia de una nueva onda folicular está relacionada con un incremento transitorio de FSH que estimula el crecimiento de un grupo de folículos. Conforme avanza la onda se establece la dominancia y los folículos subordinados dejan de crecer y posteriormente entran en regresión. El folículo dominante adquiere receptores de LH en las células de la granulosa, característica que le permite continuar su desarrollo en un ambiente con concentraciones reducidas de FSH.

En los bovinos predominan los ciclos constituidos por dos o tres ondas foliculares. La primera onda comienza alrededor de la ovulación y las siguientes aparecen en distintos momentos del ciclo según se presente un patrón de dos o tres ondas. Los folículos dominantes que se desarrollan durante la fase lútea no llegan a ovular y posteriormente regresan, mientras que el dominante de la última onda puede continuar su desarrollo hasta la ovulación. Los ciclos de dos ondas tienen una duración aproximada de 19–20 días y los de tres ondas de 22–23 días (Adams et al., 2008).

6.6.2 Dominancia folicular

Durante el establecimiento de la dominancia, el folículo de mayor desarrollo continúa creciendo mientras los demás folículos de la cohorte reducen su crecimiento y posteriormente entran en regresión. La disminución de FSH forma parte de este proceso y permite establecer diferencias entre el folículo dominante y los subordinados. Una vez iniciada la desviación, la LH adquiere importancia para que el folículo

dominante continúe su desarrollo bajo concentraciones reducidas de FSH (Ginther et al., 2001).

Esta diferencia en la respuesta de los folículos determina que uno de ellos mantenga su desarrollo y alcance la condición de dominante, mientras los subordinados evolucionan hacia la atresia. En los bovinos, el crecimiento folicular se presenta en ondas y es el folículo dominante de la última onda el que continúa su desarrollo hasta alcanzar la ovulación (Evans, 2003).

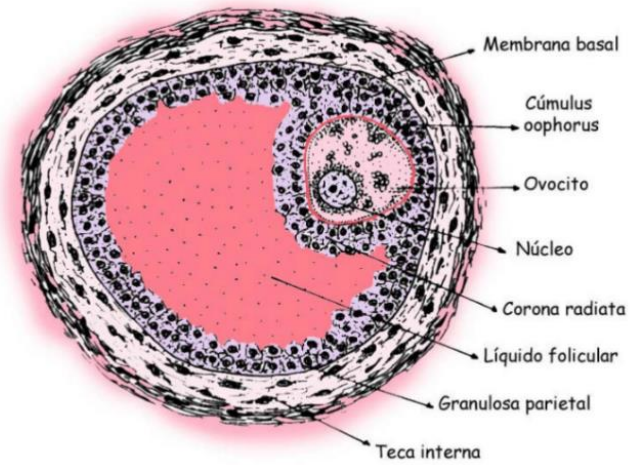


Figura 18. Folículo maduro de Graaf.

Fuente: Sánchez, A., & Díaz, S. (2006).

6.6.3 Atresia folicular

La *atresia folicular* es el destino de la mayoría de los folículos ováricos y consiste en un proceso de degradación celular programada que afecta tanto a células de la granulosa como al ovocito. De acuerdo con Webb

et al. (2007) y Scaramuzzi et al. (2011), la atresia puede ocurrir en cualquier etapa del desarrollo folicular, pero es más frecuente cuando disminuyen las concentraciones de FSH o cuando el folículo no puede competir eficazmente durante la fase de selección. Entre los mecanismos que desencadenan la atresia se incluyen la reducción en la expresión de receptores de FSH, la caída en la producción de estradiol, la activación de vías proapoptóticas como caspasas 3 y 9, y el aumento del estrés oxidativo. Asimismo, factores intraováricos como la disminución de IGF-I, la mayor actividad de inhibina y el desequilibrio entre factores del sistema BMP/SMAD pueden favorecer la apoptosis en células de la granulosa (Fortune et al., 2001). Durante la fase lútea, los altos niveles de progesterona también contribuyen a la atresia de folículos dominantes no ovulatorios. Este proceso asegura que solo aquellos folículos capaces de mantener la esteroidogénesis y responder adecuadamente a las gonadotropinas alcancen la ovulación, preservando así la eficiencia reproductiva.

6.7 Actividad Autónoma

6.7.1 Descripción de la actividad

La actividad consiste en analizar los procesos que regulan la dinámica folicular desde la fase primordial hasta la ovulación o atresia, considerando la participación de las gonadotropinas, los factores intraováricos y las diferencias entre especies domésticas. Para ello, se propone revisar el contenido del capítulo, elaborar un cuadro comparativo entre especies monotocas y politocas y resolver el

cuestionario final, con el fin de integrar los conceptos clave relacionados con el reclutamiento, selección, dominancia y atresia folicular.

6.7.2 Resultado del aprendizaje

Al finalizar esta actividad, el lector será capaz de:

- Explicar las fases del desarrollo folicular y los mecanismos que regulan su crecimiento, selección y destino final.
- Identificar diferencias interespecie en la dinámica folicular y relacionarlas con sus estrategias reproductivas.
- Analizar la interacción entre señales endócrinas y paracrinas que determinan el folículo dominante.
- Reconocer la importancia fisiológica del reclutamiento, divergencia y atresia dentro del ciclo estral.

6.7.3 Autoevaluación Capítulo VI

1. ¿Cuántos ovocitos aproximadamente posee una becerra al nacer, según Gasque Gómez (2008)?

a) 500–1 000
b) 10 000–20 000
c) 50 000–200 000
d) 300 000–500 000

2. El reclutamiento folicular ocurre principalmente debido a un incremento transitorio de:

a) Estradiol

b) Prolactina

c) FSH

d) Progesterona

3. ¿Cuál es el evento morfológico clave que marca el inicio de la selección folicular?

a) Formación del cuerpo lúteo

b) Divergencia entre folículos de la misma cohorte

c) Pico preovulatorio de LH

d) Ruptura de la vesícula germinal

4. La dominancia folicular se caracteriza por:

a) Disminución de receptores de LH y aumento de IGF-I

b) Alta producción de estradiol e inhibina-A, con aumento de receptores de LH

c) Reducción de esteroidogénesis y aumento del estrés oxidativo

d) Crecimiento sin participación hormonal

5. ¿Cuál de las siguientes especies presenta ondas foliculares bien definidas durante el ciclo estral?

a) Perra

b) Gata

c) Cerda

d) Vaca

6. ¿Qué molécula intraová rica participa en la activación de folículos primordiales y en el crecimiento preantral?

a) GDF-9
b) Cortisol
c) Renina
d) Vasopresina

7. Durante el crecimiento folicular, la competencia meiótica del ovocito se asocia principalmente a:

a) Inhibición del MPF
b) Activación de MAPK, MPF y reorganización citoplasmática
c) Disminución del EGFR
d) Ausencia de estradiol

8. En bovinos, ¿cuántas ondas foliculares se presentan típicamente en un ciclo estral?

a) 1
b) 2–3
c) 4–5
d) 6–7

9. La atresia folicular ocurre con mayor frecuencia cuando:

a) La progesterona se encuentra en niveles muy bajos
b) La FSH aumenta de forma continua
c) El folículo no puede sostener la esteroidogénesis y disminuyen los

receptores de FSH

d) Se ha producido la ovulación

10. En especies como la cerda, la dinámica folicular se caracteriza por:

a) Ondas foliculares regulares

b) Ciclos monofásicos sin crecimiento folicular

c) Crecimiento continuo de cohortes sin ondas definidas

d) Ausencia de folículos preovulatorios

BIBLIOGRAFÍA

Adams, G. P., Jaiswal, R., Singh, J., & Malhi, P. (2008). Progress in understanding ovarian follicular dynamics in cattle. *Theriogenology, 69*(1), 72–80.

Adamiak, S. J., Mackie, K., Watt, R. G., Webb, R., & Sinclair, K. D. (2006). Impact of nutrition on oocyte quality: Cumulative effects of body composition and diet leading to hyperinsulinemia in cattle. *Biology of Reproduction, 74*(5), 972–981. https://doi.org/10.1095/biolreprod.105.049312

Albarracín, J. (2005). *Reproducción animal*. Ediciones de la U.

Aristotle. (2011). *On the generation of animals* (A. L. Peck, Trans.). Harvard University Press. (Original work published ca. 350 B.C.)

Baruselli, P. S., Mucciolo, R. G., Visintin, J. A., Viana, W. G., Arruda, R. P., Madureira, E. H., & Oliveira, C. A. (1997). Ovarian follicular dynamics during the estrous cycle in buffaloes (*Bubalus bubalis*). *Theriogenology, 47*(8), 1531–1547.

Bartlewski, P. M., Beard, A. P., & Rawlings, N. C. (1999). Ovarian follicular dynamics in sheep and goats. *Small Ruminant Research, 32*(1), 1–13.

Bedford, J. M. (2018). *The functions—and dysfunctions—of the mammalian epididymis*. Springer.

Britt, J. H., Szarek, V. E., & Levis, D. G. (1990). Follicular development and ovulation in the sow. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement, 40*, 89–102.

Clarke, H., Dhillo, W. S., & Jayasena, C. N. (2015). Kisspeptin as a regulator of reproductive function. *Neuroendocrinology, 102*(4), 229–243.

CNBiotecnología. (2021). *Fisiología del aparato reproductor masculino en animales domésticos*. https://reproduccionanimalesdomesticos.fmvz.unam.mx/libro/capitulo2/aparato-reproductor-del-macho.html

Concannon, P. W. (2009). *Reproductive cycles of the domestic cat*. Cornell University Press.

Cunningham, J. (2014). *Tratado de fisiología veterinaria* (5.ª ed.). Elsevier.

Cunningham, J. G., & Klein, B. G. (2014). *Cunningham's textbook of veterinary physiology* (5th ed.). Elsevier.

Del Campo, C. H., & Ginther, O. J. (1973). Vascular anatomy of the uterus and ovaries in sheep and cattle. *American Journal of Veterinary Research, 34*(10), 1307–1313.

Del Campo, C. H., & Ginther, O. J. (1974). Arterial interrelationships and local utero-ovarian venoarterial pathways in cattle. *American Journal of Veterinary Research, 35*(1), 41–48.

Dellmann, H. D., & Eurell, J. (2006). *Histología veterinaria* (6.ª ed.). Blackwell Publishing.

Dobrescu, O. (1998). *Endocrinología básica*. Editorial Universitaria.

Dobrowolski, W., & Hafez, E. S. E. (1970). Anatomy and blood supply of the reproductive tract in sheep. *Journal of Morphology*, *131*(3), 345–360.

Driancourt, M. A. (1991). Follicular dynamics in sheep and cattle. *Theriogenology*, *35*(1), 65–79.

Dyce, K. M., Sack, W. O., & Wensing, C. J. G. (2010). *Anatomía veterinaria* (4.ª ed.). Elsevier.

E-Bookshelf. (2021). *Veterinary anatomy and physiology online*. https://www.veterinaryebookshelf.com

Evans, A. C. O. (2003). Characteristics and regulation of ovarian follicle development in domestic animals. *Animal Reproduction Science*, *78*(3), 185–199.

Evans, H. E., & de Lahunta, A. (2013). *Guía de anatomía para estudiantes de veterinaria* (7.ª ed.). Saunders/Elsevier.

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México. (s. f.). *Fisiología de la reproducción y lactancia*. https://reproduccionanimalesdomesticos.fmvz.unam.mx/

Fernández Sánchez, M. Á. (2008). *El ciclo estral de la vaca: Diagnóstico fotográfico*. Editorial Servet.

Fortune, J. E. (2003). The early stages of follicular development: Activation of primordial follicles and growth of preantral follicles. *Animal Reproduction Science, 78*(3), 135–163.

Fortune, J. E., Rivera, G. M., & Yang, M. Y. (2001). Follicular development: The role of the follicular microenvironment and endocrine influences. *Animal Reproduction Science, 79*(1–2), 1–17.

Fouladi-Nashta, A. A., Gutierrez, C. G., Gong, J. G., Garnsworthy, P. C., & Webb, R. (2007). Impact of dietary fatty acids on oocyte quality and development in lactating dairy cows. *Biology of Reproduction, 77*(1), 9–17. https://doi.org/10.1095/biolreprod.106.054213

Frandson, R. D., Wilke, W. L., & Fails, A. D. (2009). *Anatomía y fisiología de los animales domésticos* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Garbayo, J. M. (2001). Pregnancy-associated glycoproteins and early pregnancy detection in ruminants. *Theriogenology, 56*(8), 1419–1430.

García Sacristán, A. (Coord.). (2018). *Fisiología veterinaria* (ed. digital). Editorial Tébar Flores.

Gasque Gómez, J. A. (2008). *Fisiología reproductiva de los animales domésticos*. Trillas.

Getty, R. (1993). *Anatomía de los animales domésticos de Sisson y Grossman* (5.ª ed.). Salvat.

Gilbert, S. F. (2014). *Developmental biology* (10th ed.). Sinauer Associates.

Ginther, O. J. (1992). *Reproductive biology of the mare: Basic and applied aspects*. Equiservices.

Ginther, O. J. (2014). *Ovarian follicular dynamics in farm animals*. Wiley-Blackwell.

Ginther, O. J., Beg, M. A., Bergfelt, D. R., Donadeu, F. X., & Kot, K. (2001). Mechanism of follicle deviation in monovular species. *Animal Reproduction Science, 68*(1–2), 15–27.

Ginther, O. J., Bergfelt, D. R., Beg, M. A., & Kot, K. (2001). Follicle selection in cattle: Role of LH. *Biology of Reproduction, 64*(1), 197–205.

Ginther, O. J., & Del Campo, C. H. (1974). Vascular and intervascular connections of the bovine ovary. *American Journal of Veterinary Research, 35*(5), 649–656.

Green, J. A., Xie, S., Quan, X., Bao, B., Gan, X., Mathialagan, N., Beckers, J. F., & Roberts, R. M. (2005). Pregnancy-associated

glycoproteins exhibit spatially and temporally distinct expression patterns during pregnancy. *Biology of Reproduction, 72*(3), 615–623. https://doi.org/10.1095/biolreprod.104.033928

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2011). *Tratado de fisiología médica* (12.ª ed.). Elsevier.

Hafez, E. S. E., & Hafez, B. (2000). *Reproducción e inseminación artificial en animales* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Harvey, W. (1981). *Essays on generation*. Garland Publishing. (Original work published 1651)

Henao, F., & Trujillo, J. (2000). Foliculogénesis y dinámica ovárica en bovinos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 15*(2), 45–58.

Henry, M., & Loaiza Echeverri, A. M. (2013). *Andrologia veterinária básica*. CAED-UFMG.

Hernández Cerón, J. (2016). Hormonas placentarias y lactación en bovinos. *Revista de Producción Animal*, *28*(2), 45–53.

Ilera Marín, M. (1994). *Reproducción de los animales domésticos*. Editorial Aedos.

Johnston, S. D., Root Kustritz, M. V., & Olson, P. N. (2001). *Canine and feline theriogenology*. Saunders.

Kardong, K. V. (2012). *Vertebrates: Comparative anatomy, function, and evolution* (6th ed.). McGraw-Hill.

Kastelic, J. P., & Rizzoto, G. (2021). Thermoregulation of the testes. In R. M. Hopper (Ed.), *Bovine reproduction* (2nd ed., pp. 40–46). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119602484.ch4

Kenhub. (2023). *Ductus deferens anatomy*. https://www.kenhub.com

Kim, J. Y., Kinoshita, M., Ohnishi, M., & Fukui, Y. (2001). Lipid and fatty acid composition of bovine oocytes and early embryos cultured in serum-free or serum-containing medium. *Reproduction, 122*(1), 131–138. https://doi.org/10.1530/rep.0.1220131

Knobil, E., & Neill, J. D. (2006). *Physiology of reproduction* (3rd ed.). Academic Press.

König, H. E., & Liebich, H. G. (2014). *Anatomía de los animales domésticos* (6.ª ed.). Médica Panamericana.

König, H. E., & Liebich, H. G. (2016). *Anatomía de los animales domésticos* (6.ª ed.). Médica Panamericana.

Lamond, D. R., & Drost, M. (1974). The uterine and ovarian vasculature in cattle: Anastomoses and functional implications. *Theriogenology, 2*(3), 109–121.

Leeuwenhoek, A. van. (1987). *Selected letters* (L. Dobell, Ed.). Dover Publications. (Original work published 1677)

Lenis Sanín, C. (2014). *Reproducción bovina: Fundamentos fisiológicos y aplicaciones prácticas*. Universidad de Antioquia.

Lenis Sanín, F. (2014). *Reproducción de los animales domésticos*. Universidad de Antioquia.

LibreTexts. (2022). *Endocrinology of reproduction*. Biology LibreTexts. https://bio.libretexts.org/

McDonald, L. E. (2012). *Veterinary endocrinology and reproduction*. Wiley-Blackwell.

McEntee, K. (1990). *Reproductive pathology of domestic animals*. Academic Press.

McEvoy, T. G., Coull, G. D., Broadbent, P. J., Hutchinson, J. S., & Speake, B. K. (2000). Fatty acid composition of lipids in immature cattle, pig and sheep oocytes with intact zona pellucida. *Journal of Reproduction and Fertility, 118*(1), 163–170. https://doi.org/10.1530/jrf.0.1180163

McKay, K., & Kolesov, S. (2023). Seminal plasma composition and accessory gland function in domestic mammals. *Animal Reproduction Science, 248*, 107109.

McKibben, M. J., Burnett, A. L., & Christ, G. J. (2021). Neurovascular mechanisms of penile erection. *Journal of Sexual Medicine, 18*(4), 593–604.

Megías, M., Molist, P., & Pombal, M. A. (s. f.). *Hipotálamo*. Universidad de Vigo. https://mmegias.webs.uvigo.es/

Molnar, G., & Gair, M. (2015). *Cell signaling and hormone receptors*. Cambridge University Press.

Noakes, D. E., Parkinson, T. J., & England, G. C. W. (2018). *Arthur's veterinary reproduction and obstetrics* (10th ed.). Elsevier.

Ordóñez, R. (s. f.). *Gonadotropina coriónica equina y su uso reproductivo* [Manual técnico veterinario].

Palma, G. A. (2001). Desarrollo folicular y fisiología ovárica en bovinos. *Revista de la Facultad de Ciencias Veterinarias, 12*(1), 23–35.

Porras Almeraya, A., & Páramo Ramírez, R. M. (Eds.). (2009). *Manual de prácticas de reproducción animal* (1.ª ed.). Universidad Nacional Autónoma de México.

Rao, T. K. S., & Madan, M. L. (1997). Postpartum ovarian activity and follicular dynamics in Murrah buffaloes. *Animal Reproduction Science, 46*(1–2), 171–180.

Reece, W. O. (2015). *Dukes' physiology of domestic animals* (13th ed.). Wiley-Blackwell.

Robaire, B., & Hinton, B. T. (2015). *The epididymis: From molecules to clinical practice*. Springer.

Roberts, S. J. (1971). *Veterinary obstetrics and genital diseases*. Edwards Brothers.

Romer, A. S., & Parsons, T. S. (1986). *The vertebrate body* (6th ed.). Saunders College Publishing.

Ryan, K. J., Berkowitz, R. S., Barbieri, R. L., Dunaif, A., & Yen, S. S. C. (2008). *Yen and Jaffe's reproductive endocrinology: Physiology, pathophysiology, and clinical management* (6th ed.). Saunders Elsevier.

Samuelson, D. A. (2013). *Textbook of veterinary histology* (2nd ed.). Elsevier.

Sánchez, A., & Díaz, S. (2006). *Sistema reproductor en hembra y macho: Histología para la carrera de bioterio*. Universidad de Buenos Aires.

Scaramuzzi, R. J., Baird, D. T., Campbell, B. K., et al. (2011). Regulation of folliculogenesis and determination of ovulation rate in ruminants. *Reproduction, Fertility and Development, 23*(3), 444–467.

Sebastián-Abad, E., Gimeno-Martos, S., & Silvestre, M. A. (2021). Eyaculado y fraccionamiento seminal en especies domésticas. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias, 15*(1), 1–12.

Senger, P. L. (2012). *Pathways to pregnancy and parturition* (3rd ed.). Current Conceptions.

Setchell, B. (2006). *The mammalian testis* (2nd ed.). Elsevier.

Sisson, S., & Grossman, J. D. (2006). *Anatomía de los animales domésticos*. Elsevier.

Sisson, S., & Grossman, J. D. (2015). *Anatomía de los animales domésticos* (5.ª ed.). Médica Panamericana.

Spallanzani, L. (1965). *Experiments on the reproduction of animals*. Hafner Publishing. (Original work published 1784)

Sun, F., Báez-Díaz, C., & Sánchez-Margallo, F. M. (2017). Canine prostate models in preclinical studies of minimally invasive interventions: Part I. *Translational Andrology and Urology, 6*(3), 538–546.

Thatcher, W. W., Santos, J. E. P., & Staples, C. R. (2003). Dietary polyunsaturated fatty acids and reproduction in ruminants. *Journal of Reproduction and Fertility. Supplement, 61*, 1–16.

Ungerfeld, R. (2020). *Biología reproductiva del macho doméstico*. Hemisferio Sur.

Ungerfeld, R. (2020). *Reproducción de los animales domésticos*. Hemisferio Sur.

University of Minnesota College of Veterinary Medicine. (s. f.). *Male reproductive accessory glands by species*. https://vetmed.umn.edu

Van Soest, P. J. (1994). *Nutritional ecology of the ruminant* (2nd ed.). Cornell University Press.

Vatti, A. (1969). Oxitocina y funciones reproductivas. *Revista de Endocrinología Clínica, 12*(3), 112–120.

Vera Esmeraldas, D., Marini, M., Mendoza, E., & Zambrano Villacís, J. (2022). Hormona antimülleriana en bovinos: Aplicaciones reproductivas. *Revista Ecuatoriana de Ciencias Pecuarias*, *5*(1), 33–45.

Wanke, M. M., & Gobello, C. (2006). *Reproducción en caninos y felinos domésticos* (1.ª ed.). Inter-Médica.

Webb, R., Garnsworthy, P. C., Gong, J. G., & Armstrong, D. G. (2007). Control of follicular growth: Local interactions and nutritional influences. *Journal of Animal Science, 85*, E34–E35.

Wiltbank, M. C., Baez, G. M., & Garcia-Guerra, A. (2016). Physiological basis for reproductive success in cattle. *Animal Reproduction, 13*(3), 338–345.

Xie, Y., Wang, H., Sun, X., & Li, J. (2022). Kisspeptin signaling and reproductive physiology. *Frontiers in Endocrinology, 13*, 1–12.

Zeron, Y., Sklan, D., & Arav, A. (2001). Effect of polyunsaturated fatty acid supplementation on bovine oocytes and embryos. *Reproduction, 121*(3), 553–559. https://doi.org/10.1530/rep.0.1210553

Zoli, A. P., Guilbault, L. A., Delahaut, P., Ortiz, W. B., & Beckers, J. F. (1992). Radioimmunoassay of pregnancy-associated glycoproteins in serum of cattle. *Biology of Reproduction, 46*(1), 83–92.

Reproducción bovina y especies domésticas, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-40-5

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DEL AUTOR

Freddy Fausto Macas Apolo:

Es Médico Veterinario y docente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala, en la Carrera de Medicina Veterinaria. Se desempeña como profesor de las asignaturas Reproducción Animal, Fisiología II. Las áreas de interés académico y profesional incluyen la fisiología reproductiva, la endocrinología reproductiva y la aplicación de biotecnologías reproductivas en especies domésticas, con énfasis en bovinos.

REPRODUCCIÓN BOVINA Y ESPECIES DOMÉSTICAS

Estimado lector, la reproducción animal es una disciplina que avanza con rapidez y demanda profesionales capaces de integrar conceptos fisiológicos, biotecnológicos y de manejo en un marco práctico. A lo largo de los años, he tenido la oportunidad de observar cómo este campo se transforma, impulsado por nuevas técnicas, nuevas preguntas y una renovada necesidad de eficiencia en los sistemas de producción. En este contexto, obras como la que el lector tiene en sus manos resultan especialmente valiosas, pues ofrecen una visión clara, actualizada y aplicable del quehacer reproductivo.

El autor presenta un enfoque estructurado y accesible, que combina fundamentos científicos con la experiencia acumulada en el trabajo académico y de campo. Esta integración logra un equilibrio poco común entre teoría y práctica, permitiendo que estudiantes, veterinarios y técnicos encuentren en estas páginas no solo explicaciones rigurosas, sino también herramientas reales para la toma de decisiones. Es precisamente ese carácter aplicado lo que convierte a este libro en un recurso necesario para quienes buscan comprender y mejorar los procesos reproductivos en especies domésticas.

A lo largo del texto, se percibe un compromiso genuino con la formación profesional y con el desarrollo de la producción animal en nuestra región. La claridad conceptual, el respaldo bibliográfico y la pertinencia temática reflejan la dedicación del autor y su interés por fortalecer las bases científicas en nuestras aulas y en el ejercicio clínico. Por ello, es un honor acompañar esta obra con un prólogo que reconoce su aporte y celebra la iniciativa de poner al alcance de los lectores un material tan completo y cuidadosamente elaborado.

Invito al lector a adentrarse en estas páginas con el espíritu crítico y la curiosidad que caracterizan a los buenos profesionales. Estoy seguro de que encontrarán un contenido sólido y bien fundamentado, capaz de servir tanto como guía de estudio como referencia permanente en el ejercicio de la reproducción animal.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-40-5

9 789907 802405

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
1969