

Sociedades rurales, producción y medio ambiente

ISSN 2007-7556



Revista semestral del Departamento de Producción Agrícola
y Animal de la UAM-X



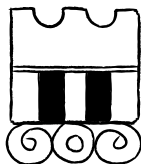
Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

49

Diciembre-Julio
2025

Sociedades rurales, producción y medio ambiente

Sociedades rurales, producción y medio ambiente



Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD XOCHIMILCO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Rector General
Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria General
Dra. Norma Rondero López

UNIDAD XOCHIMILCO

Rector
Dr. Francisco Javier Soria López

Secretaria
Dra. Ma. Angélica Buendía Espinosa

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

Director
Dr. Luis Amado Ayala Pérez

Jefe del Depto. de Producción Agrícola y Animal
Mtro. Iván Pável Moreno Espíndola

Director de la revista
Adolfo Álvarez Macías

COMITE EDITORIAL

Ciencias Agrícolas
Dr. Carlos H. Ávila Bello
Centro de Estudios Interdisciplinarios de Agrobiodiversidad
(CEIAbio)
Universidad Veracruzana

Dr. Rodolfo Figueroa Brito
Centro de Desarrollo de Productos Bióticos
Instituto Politécnico Nacional

Dr. Daniel Ruiz Juárez
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Ciencias Pecuarias
Dr. Carlos Arriaga Jordán
Instituto de Ciencias Agropecuarias y Desarrollo Rural
Universidad Autónoma del Estado de México

Dr. Luis Corona Gochi
Jefe del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica
Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Antonio Martínez García
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Calidad e Inocuidad de Productos Agroalimentarios
Dr. Arturo Camilo Escobar Medina †
Centro Nacional de Sanidad Agropecuaria (Cuba)

Dr. Eduardo Morales Barrera, UAM-X
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Dra. Silvia D. Peña Betancourt
Departamento de Producción Agrícola y Animal
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco

Economía y Desarrollo Rural
Dra. Tamara Perelmuter
Instituto de Investigaciones Gino Germani (IIGG)
Universidad de Buenos Aires

Acuicultura y Pesca
Dr. Iván Gallego Alarcón

Diseño y formación
D. C. G. Mary Carmen Martínez Santana

Corrección de estilo
D. C. G. Marbella Vianney Olmos Sánchez

SOCIEDADES RURALES, PRODUCCIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Año 2025, número 49, diciembre-julio de 2025 es una publicación semestral de la Universidad Autónoma Metropolitana, a través de la Unidad Xochimilco, División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Departamento de Producción Agrícola y Animal. Prolongación Canal de Miramontes No. 3855, Col. Rancho los Colorines, Alcaldía Tlalpan, Código Postal 14386, Ciudad de México, y Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04960, México, Ciudad de México, Tel. 54837231 y 54837230.

Página electrónica de la revista:

<https://sociedadesruralesojs.xoc.uam.mx/index.php/srpma>

Dirección electrónica: aalvarez@correo.xoc.uam.mx

Editor Responsable Profr. Adolfo Guadalupe Álvarez Macías.

Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2022-092811003900-102, ISSN 2007-7556, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor.

Responsable de la última actualización de este número:

Mary Carmen Martínez Santana.

Fecha de la última modificación: 10 de febrero de 2025.

Tamaño del archivo 5167 KB.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

© 2000, Universidad Autónoma Metropolitana, D.R.

Índice

Editorial	9
Política de la revista	13
ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN	
Emociones y su vínculo con la expresión facial en el bienestar de animales domésticos <i>Daniel Mota Rojas, Adriana Domínguez Oliva, Alejandro Casas Alvarado, Fabiola Torres Bernal, Cécile Bienboire Frosini, Ana C. Strappini, Agustín Orihuela, Ismael Hernández Avalos, Alexandra L. Whittaker</i>	15
Calidad gamética y reproducción asistida en <i>Oncorhynchus mykiss</i>: líneas fenotípicas en el Centro Acuícola El Zarco, Estado de México <i>Nayeli Berenice Aguirre Valenzuela, Jesús Damaso Bustamante González, Abigail Mendoza Mondragón, Araceli Cortés García</i>	45
Dependencia de las importaciones de fertilizantes y ventaja comparativa revelada 2016-2023: Perspectivas para México y Ecuador <i>Robert Carcamo Mallen, Claudia Coral Caroline Hambloch, Adolfo Guadalupe Álvarez Macías</i>	71
Uso de la inmunoinformática en el diseño de vacunas basadas en epítomos <i>José de Jesús Lira Ricárdez, Lucía Ortega Cabello, Yolanda Margarita Sánchez Castilleja, Jorge Joel Reyes Méndez</i>	97

Enfermedades zoonóticas transmitidas por perros <i>Yolanda M. Sánchez Castilleja, Adrián Emmanuel Iglesias Reyes, Juan José Ortega Reyes</i>	127
--	------------

NOTA DE INVESTIGACIÓN

Ecodiseño como estrategia de sustentabilidad en el sistema de producción de barbacoa en el municipio de Capulhuac, Estado de México <i>Ignacio López Moreno, Omar Miranda Gómez, Félix Aguirre Garrido</i>	147
--	------------

RESEÑAS

Más allá del colonialismo verde: justicia global y geopolítica de las transiciones ecosociales <i>Héctor López Terán</i>	161
--	------------

Multicrisis, agricultura y seguridad alimentaria en Centroamérica: una aproximación a su estudio <i>Adriana Moreno Blanco</i>	165
---	------------

Guía de autores	169
------------------------	------------

Editorial

La revista *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente*, preserva su objetivo de difundir avances científicos, tecnológicos y humanísticos, así como los análisis de eventos que están caracterizando los nuevos desafíos del medio rural, del sistema agroalimentario en México y en otras latitudes, de la gestión de los recursos naturales, así como temas tan diversos como los vinculados a los recursos genéticos, el bienestar animal, tecnologías agrícolas y pecuarias, así mismo los relacionados con el mercadeo, inocuidad y alimentación humana, entre otros.

Bajo esa óptica la revista prosigue su de aparición regular desde hace casi 25 años, confirmándose con este número el compromiso institucional de preservar su vigencia, gracias al respaldo del Departamento de Producción Agrícola y Animal, de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. La publicación sigue mejorando sus procesos editoriales, así como de economía, conforme a los tiempos de austeridad que vive nuestra Universidad y la economía nacional en su conjunto, por lo cual se difunde exclusivamente bajo formato digital. En los últimos volúmenes se ha mantenido el número de colaboraciones, lo que suele propiciar algunos retrasos en la aparición puntual de la revista, pero ha sido posible mantener la comunicación con un mayor número de autores y revisores y, en especial, ha implicado un acercamiento a los estándares de calidad que exigen los índices de revistas.

Por lo anterior, se reconocen ampliamente las aportaciones de autores, árbitros y editoras, que han resultado fundamentales en el proceso de mejora continua de la revista. En este contexto, sigue abierta la convocatoria para que investigadores y estudiosos de diversas instituciones nacionales y del extranjero, y desde las diferentes disciplinas relacionadas al desarrollo de las sociedades rurales, producción agrícola, pecuaria, forestal y pesquera, así como del medio ambiente, propongan aportaciones derivadas de sus investigaciones que coadyuven a entender y atender problemas tan relevantes como la inseguridad alimentaria, los bajos índices de productividad vegetal y animal, el deterioro de los recursos naturales y el medio ambiente y la pobreza rural, los que han desembocado en el desarrollo desigual y en variados obstáculos para un desarrollo agropecuario, agroalimentario y rural sostenible, equitativo y competitivo.

Por el contrario, existen opciones de abonar a las fortalezas y oportunidades que derivan del actual modelo de desarrollo, como las producciones y los mercados orgánicos, las tecnologías agroecológicas, prácticas de conservación y restauración de los recursos naturales y fauna silvestre, economía del hogar y participación de la mujer en las actividades rurales, procesos asociativos innovadores y los nuevos hábitos de consumo, por mencionar algunos de los más relevantes. En este número se presentan ocho contribuciones que revelan el carácter multidisciplinario de la publicación. En el primer artículo se analizan las emociones y su vínculo con la expresión facial como una forma de evaluar el bienestar animal. Lo anterior implica comprender las modificaciones fisiológicas, cognitivas y motoras asociadas tanto a emociones positivas como negativas. Por ello, se analiza la neurobiología de las emociones en animales domésticos y las expresiones faciales, además de las características de las emociones positivas durante el acicalamiento o anticipación positiva, y a emociones negativas como miedo y ansiedad. También, se aborda el dolor como un estado negativo y los principales cambios que genera en la expresión facial. En el segundo artículo se expone la evaluación de la calidad gamética de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) de líneas fenotípicas en el Centro Acuícola “El Zarco” durante tres meses. Se analizaron parámetros biométricos, fisicoquímicos y de calidad espermática en líneas Amanalco, Poblano, HN y Pool, y características de ovocitos en Z18 y HN. Las combinaciones reproductivas entre machos Amanalco y hembras Z18/HN alcanzaron un 90% de fertilización y 95% de eclosión. Se constata que combinaciones específicas entre líneas mejoran la eficiencia reproductiva y favorecen una acuicultura sostenible.

En la tercera contribución se analiza la ventaja comparativa revelada de México y Ecuador en fertilizantes, destacando que la intensidad de las importaciones y las respuestas de política pública de ambos países carecen de ventajas comparativas en la producción de estos agroquímicos nitrogenados y potásicos. Solo Ecuador posee una ventaja comparativa en la producción de fertilizantes fosfatados, que se atribuye a las reexportaciones de Rusia a Chile. Se concluye que tanto México como Ecuador deben priorizar la diversificación y la inversión en alternativas sostenibles para mitigar vulnerabilidades de la producción agrícola y la seguridad alimentaria, como la diversificación de los flujos de fertilizantes de otros socios comerciales para garantizar el abasto nacional. En el cuarto artículo, se analizan las herramientas inmunoinformáticas para la creación de vacunas basadas en epítomos y se explora su aplicación en el diseño de vacunas contra enfermedades en humanos y animales. Los epítomos son subunidades de un antígeno que resultan claves en la respuesta inmunitaria adaptativa. Para asegurar una respuesta eficaz, ya sea postinfecciosa o postvacunal, los epítomos deben cumplir ciertas propiedades como antigenicidad, inmunogenicidad, alergenicidad y otras características fisicoquímicas.

En el quinto artículo se analiza la transmisión de enfermedades parasitarias, bacterianas y víricas a humanos por perros, causando en ambas especies signos y síntomas que en casos extremos pueden llegar a la muerte. Por ello, resulta esencial aportar conocimiento sobre algunas de estas enfermedades zoonóticas, dado el creciente papel de los perros como mascotas. Se reportan las elevadas prevalencias, lo que indica el reconocimiento de estas enfermedades para entablar acciones de prevención, control

y erradicación, con la participación de todos los sectores de la salud pública. En la sexta contribución, en una nota de investigación, se caracteriza la producción y venta de barbacoa en Capulhuac, Estado de México. Se proponen soluciones circulares como el caso de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales, y el vermicompostaje para el aprovechamiento de residuos orgánicos. Se concluye que la viabilidad de estas estrategias requiere políticas públicas integradas, de financiamiento y capacitación continua.

Finalmente, se presentan dos reseñas de textos recientes y trascendentes. En la primera; *Más allá del colonialismo verde: justicia global y geopolítica de las transiciones ecosociales*, se denuncia que el capitalismo ha erigido andamios de un escenario "enverdecido" sin alterar el guion de la obra. Sus respuestas se presentan como soluciones a los mismos problemas que sus contradicciones han generado. No obstante, su metabolismo de producción y consumo, orientado a la ganancia, se acerca más al punto de no retorno frente a los límites biofísicos del planeta. Bajo esa lógica se ofrecen soluciones "verdes" que reafirman el orden existente. En la segunda reseña se centra en el texto *Multicrisis, agricultura y seguridad alimentaria en Centroamérica: una aproximación a su estudio*, en el cual se analiza el fenómeno de las multicrisis y su impacto en la agricultura y la seguridad alimentaria en cinco países: Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. Su objetivo principal fue examinar cómo la convergencia de crisis climáticas, económicas, sanitarias (como la pandemia de COVID-19) y políticas ha intensificado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas y agravado la inseguridad alimentaria en la región contraviniendo los avances logrados en varios lustros anteriores.

Por otro lado, en esta ocasión con profundo pesar anunciamos la partida del Dr. Arturo Camilo Escobar Medina, destacado integrante de nuestro Comité Editorial. Para sus familiares, colegas y amigos, nuestras más sentidas condolencias.

Por último, se reitera que esta revista prosigue en un proceso de mejora general que se mantendrá para que se logre el reconocimiento necesario que motive a nuevos autores y lectores, por tanto, son bienvenidas todas las sugerencias y observaciones que coadyuven en este sentido. A la vez, esta publicación está abierta a todas las propuestas académicas de calidad susceptibles de ser publicadas.

Adolfo Álvarez Macías
Director

Política

La revista *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* inició actividades desde hace casi 25 años en el seno del Departamento de Producción Agrícola y Animal (DPAA), de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Se creó con el objetivo de difundir conocimientos y métodos de investigación originales en las ciencias biológicas, sociales y otras afines que traten de explicar los problemas y desafíos científicos de diferente índole que confrontan el desarrollo de las sociedades rurales, especialmente aquellas vinculadas a la producción primaria y a la gestión de sus territorios. Por ello, se analizan sus medios de vida, sea en la agricultura, ganadería, acuacultura y en la conservación de los recursos naturales y de la fauna silvestre. Todo ello enmarcado en los sistemas alimentarios y el desarrollo regional que se imbrican en un continuo proceso de reestructuración que generan nuevos desafíos como la creciente crisis climática, la inseguridad alimentaria, la pobreza, la inequidad de género y las complejas relaciones internacionales, entre otros.

En ese contexto, la revista mantiene su compromiso de abrir espacios para los análisis y discusiones que generen propuestas frente a los problemas y retos locales, regionales, nacionales y globales a los que se enfrentan los sistemas de producción vegetal y animal. En ese sentido, la revista se orienta hacia la evaluación de la investigación original, de frontera y que desde distintas disciplinas aborden el estudio de las sociedades rurales y sus múltiples interconexiones con el entorno. Bajo esta perspectiva, se pretende que las distintas contribuciones que se presentan a esta revista aborden cada temática con rigor científico y con una visión humanista que brinde proyección y sentido a los resultados presentados.

En los últimos meses se han presentado varios macro eventos que han marcado el funcionamiento y el devenir de las sociedades rurales y de los sistemas agroalimentarios. Por un lado, el cambio climático y sus crecientes repercusiones, que está obligando a tomar medidas de mitigación, adaptación y transformación de prácticas como el manejo de especies, variedades y razas, así como adoptar conocimientos y tecnologías idóneas que permitan mantener y optimizar los ciclos de producción y circulación de productos agropecuarios, materias primas y alimentos y, además, de asociar la restauración de los recursos naturales y el medio ambiente. Los efectos de la pandemia del COVID 19 también incidieron en el retiro temporal de varios actores del medio rural y agroalimentario, así como la ruptura de múltiples cadenas productivas que implicó algunas cuestiones positivas, como la regeneración de recursos naturales y descenso de agentes contaminantes, pero también otros cambios críticos, como la reducción de los ingresos de amplias capas de la población y el descenso de la producción agrícola y animal, generando

un aumento en los niveles de pobreza, de personas en inseguridad alimentaria, de inflación y de crisis de las finanzas públicas, entre otras secuelas.

A la par, la invasión rusa a Ucrania y los conflictos en medio oriente han supuesto otras convulsiones a escala global, dado que se trata de países que directa e indirectamente influyen en la producción y mercados agroalimentarios, lo que ha repercutido en el alza de precios internacionales y nacionales de estos productos. El segundo período de Donald Trump como presidente de Estados Unidos de América también ha desencadenado múltiples efectos adversos para diferentes países, en especial, para México. Ante ello, se intensifica la demanda de mayores investigaciones y análisis que consideren en su contexto estas dinámicas y, en su caso, que generen información sustantiva para formular explicaciones y alternativas que contribuyan a la comprensión y elaboración de respuesta a estos desafíos.

En este marco, se reitera que la política de la revista promueve la publicación de trabajos que aporten información inédita y objetiva, bajo las siguientes cuatro modalidades: i) Artículos de investigación, ii) Artículos de revisión y Notas de investigación, iii) Ensayos, y iv) Reseñas. Ello con el fin de proseguir con su publicación periódica semestral, la cual se ha mantenido desde el año 2000. Por esta razón, siempre se agradece la colaboración de autores, revisores, cuerpo editorial y las autoridades universitarias correspondientes. Gracias a estas ayudas se ha continuado con la mejora progresiva la revista en cuanto a los mecanismos de evaluación de los manuscritos que se presentan y se han acortado los períodos de respuesta a los autores, lo que cada vez acerca más a la revista al nivel de una publicación de calidad susceptible de ingresar a los índices de revistas más relevantes del país. Para ello, ha sido apreciable el impulso que mantiene el DPAA, que se ha comprometido en la divulgación de resultados de investigaciones de cuerpo de académicos, como lo mandata la Ley Orgánica universitaria. Así, la publicación se mantiene como un campo abierto, crítico y constructivo que busca enriquecer las explicaciones científicas e interpretaciones que coadyuven al desarrollo rural, agropecuario, alimentario y regional, teniendo como principios rectores: la equidad, la sostenibilidad y la competitividad.

Aparte de las contribuciones individuales, también se viene fomentando la edición de números temáticos, desarrollados por grupos formales e informales de investigación, para el abordaje de objetos de estudio comunes bajo distintas ópticas analíticas, métodos de trabajo e, incluso, disciplinas. Para los interesados en esta última opción se les invita a contactar a la dirección de la revista para coordinar de la mejor manera posible alternativas de este tipo.

Para más información sobre la publicación, favor de dirigirse a:

Adolfo Álvarez Macías, Director de la revista.

Edificio 34, tercer piso.

Jefatura del Departamento de Producción Agrícola y Animal.

Calzada del Hueso 1100, Col. Villa Quietud, 04960, Ciudad de México.

Tels. 555483-7230 y 7231.

e-mail: aalvarez@correo.xoc.uam.mx

Emociones y su vínculo con la expresión facial en el bienestar de animales domésticos

Daniel Mota Rojas¹, Adriana Domínguez Oliva¹, Alejandro Casas Alvarado¹, Fabiola Torres Bernal¹, Cécile Bienboire Frosini², Ana C. Strappini³, Agustín Orihuela⁴, Ismael Hernández Avalos⁵, Alexandra L. Whittaker⁶

Resumen. *En medicina veterinaria, las expresiones faciales y su relación con las emociones se han empleado como método para evaluar el bienestar animal. Abordar el estudio de las emociones implica comprender las modificaciones fisiológicas, cognitivas y motoras asociadas a emociones positivas y negativas. Analizar las expresiones faciales como medio de comunicación permite identificar la forma en que los animales las emplean para abordar situaciones adversas sociales o ambientales, aportando al entendimiento de emociones tanto positivas como negativas. La presente revisión tiene como objetivo analizar la neurobiología de las emociones en animales domésticos y las expresiones faciales, además de las características de las emociones positivas durante el acicalamiento o anticipación positiva, y a emociones negativas como miedo y ansiedad. De igual forma, se abordará el dolor como un estado negativo y los principales cambios en la expresión facial.*

Palabras clave: *Bienestar animal, Expresiones faciales, Emociones, Placer, Miedo, Ansiedad.*

¹ Departamento de Producción Agrícola y Animal. Universidad Autónoma Metropolitana. Ciudad de México. México.

² EPLEFPA-Avignon, Campus Agroparc, Route de Marseille, Avignon, France.

³ Departament Animal Health & Welfare, Wageningen Livestock Research, Wageningen University & Research, Países Bajos.

⁴ Comportamiento y bienestar animal. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, México.

⁵ Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. UNAM.

⁶ School of Animal and Veterinary Sciences, Roseworthy Campus, University of Adelaide, Roseworthy, Australia.

* Correspondencia: Daniel Mota Rojas, correo electrónico: dmota@correo.xoc.uam.mx

Abstract. *In veterinary medicine, facial expressions and their association with emotions have been used as a method to assess animal welfare. Studying emotions requires an integrated understanding of the physiological, cognitive, and motor changes linked to both positive and negative emotional states. Analyzing facial expressions as a means of communication allows for the identification of how animals use them to respond to adverse social or environmental situations, thereby contributing to a deeper understanding of both positive and negative emotions. Therefore, the aim of this review is to analyze the neurobiology of emotions in domestic animals and their associated facial expressions, with particular emphasis on the features of positive emotions observed during grooming or positive anticipation, as well as negative emotions such as fear and anxiety. Pain will also be addressed as a negative affective state, along with the principal facial expression changes that accompany it.*

Keywords: *Animal welfare, Facial expressions, Emotions, Pleasure, Fear, Anxiety.*

INTRODUCCIÓN

En las últimas tres décadas, el reconocimiento de las emociones en animales no humanos ha generado un creciente interés atribuido al reconocimiento de que son seres sintientes (Kremer *et al.* 2020). De manera general, las emociones se estudian a través de tres componentes: 1) El subjetivo, relacionado a la experiencia emocional; 2) El fisiológico; y 3) El motor (Zimmermann *et al.* 2024). Debido a que los animales carecen de la habilidad verbal para expresar su estado mental, el estudio de las emociones en animales se enfoca principalmente en el componente motor, el cual incluye el comportamiento, el lenguaje corporal y la expresión facial (Wathan y McComb, 2014; Neethirajan *et al.* 2021; Domínguez-Oliva *et al.* 2024; Mota-Rojas *et al.* 2024).

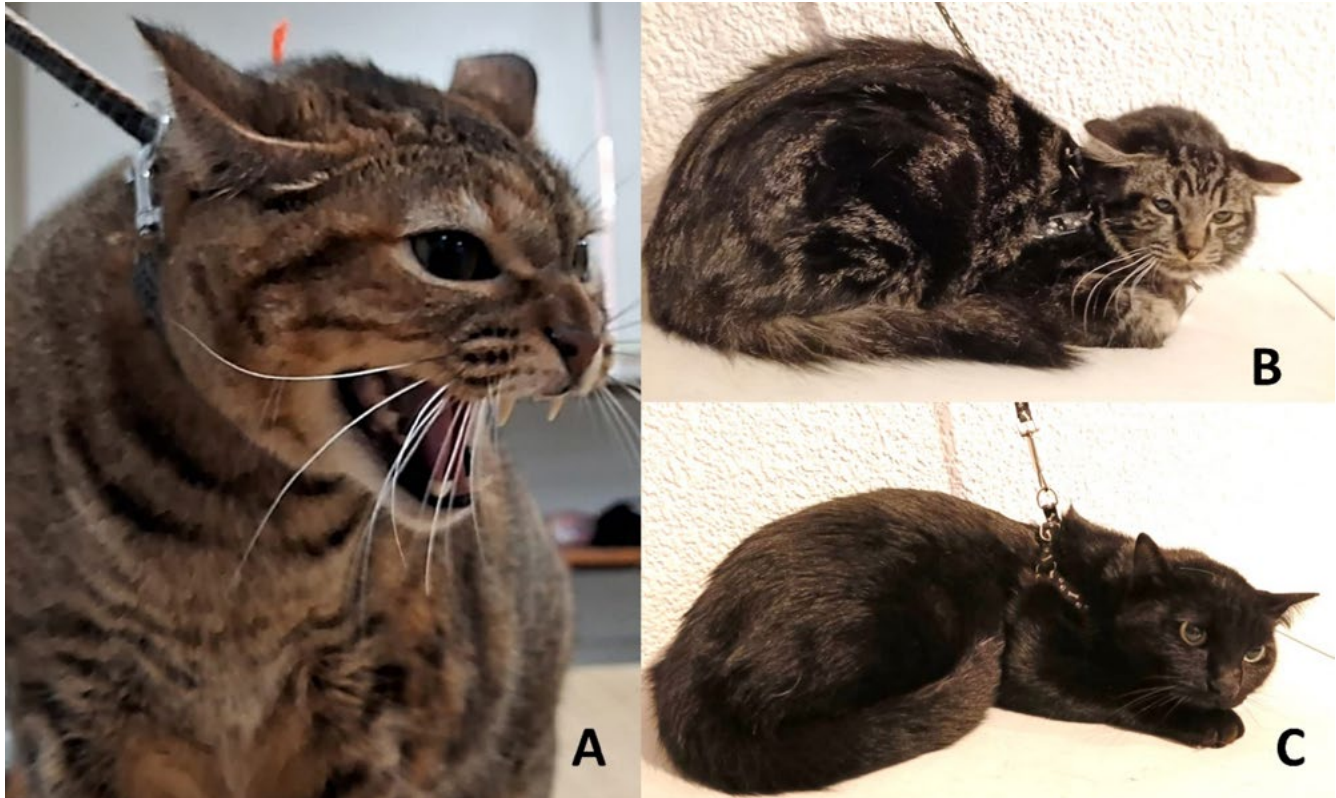
La asociación entre las emociones y la expresión facial proviene de que las emociones se describen como respuestas afectivas relativamente intensas y rápidas a estímulos específicos, ya sean intrínsecos (internos al organismo) o extrínsecos (provenientes del entorno) (Anderson y Adolphs, 2014; Csoltova y Mehinagic, 2020a). Se consideran reacciones complejas que involucran respuestas neurofisiológicas en función al estímulo percibido y el contexto (Lezama-García *et al.* 2019; Domínguez-Oliva *et al.* 2024). Esto coincide con lo propuesto por Paul y Mendl (2018) y Zablocki-Thomas *et al.* (2022), quienes las definen como una respuesta multicomponente a la presencia de un estímulo o evento, ya que involucra aspectos fisiológicos, neurológicos, cognitivos y conductuales.

Estos estados están estrechamente relacionados con la actividad de circuitos neuronales regulados por el sistema límbico, el cual involucra estructuras corticales y subcorticales, entre las que destacan la amígdala, el hipotálamo, el hipocampo y la corteza prefrontal (McLennan y Mahmoud, 2019;

Domínguez-Oliva *et al.* 2024). Dichas estructuras son responsables de generar respuestas cognitivas, somáticas y fisiológicas asociadas a la conducta emocional (Anderson y Adolphs, 2014). Su caracterización se centra en cinco componentes coordinados: 1) Sentimientos, que cambian de acuerdo con la experiencia de manera “subjetiva”. Este último término hace referencia a que los animales no humanos no son exactamente homólogos con las emociones de los humanos, esto genera el concepto de estudio “emociones primitivas” (Carranza *et al.* 2010; Anderson y Adolphs, 2014); 2) Cognitivo, asociado a los cambios neuronales relacionados a la atención, recepción y toma de decisiones; 3) Acción, son los cambios que se generan en la ejecución de una respuesta específica; 4) Expresión, en donde se evalúan las expresiones faciales, vocalizaciones y postura; y 5) Fisiología, en este componente se presentan cambios en la actividad fisiológica y neuronal (Kremer *et al.* 2020).

Panksepp (1982; 2017) ha descrito siete sistemas emocionales primarios, los cuales son búsqueda, placer, cuidado, juego –emociones positivas– y miedo, rabia/ira y pánico/tristeza como emociones negativas (Panksepp, 1982; Montag y Panksepp, 2017). Debido a la multidimensionalidad de las emociones es posible explicar las respuestas fisiológicas que involucra el Sistema Nervioso Autónomo (SNA) para mantener la homeostasis del organismo (Anderson y Adolphs, 2014). Por ejemplo, durante disputas territoriales, los animales exhiben modificaciones conductuales como vocalizaciones intensas y piloerección a lo largo del dorso, manifestaciones que funcionan como señales de advertencia frente a una posible confrontación física. (Kleszcz *et al.* 2022). Además, se observan cambios en la expresión facial como la elevación del labio superior o el aplanamiento de las orejas que sirven de advertencia ante una confrontación entre congéneres (Mota-Rojas *et al.* 2021). La Figura 1 ejemplifica los cambios a nivel postural y de expresión facial de un gato en respuesta estímulos negativos.

Figura 1. Posturas corporales y expresiones faciales asociadas a respuestas de miedo en el gato doméstico (*Felis catus*)



A. Se observa una expresión facial de tipo defensivo caracterizada por la exposición de las piezas dentarias, acompañada de una inclinación cefálica y aplanamiento auricular bilateral. Esta configuración sugiere una respuesta de amenaza con intención disuasoria, común en contextos de miedo agudo con posibilidad de escalamiento agresivo.

B. Postura corporal de tipo defensiva-retirada, con aplanamiento de orejas, ocultamiento de los miembros y adosamiento caudal al tronco, orientada a la protección de la región ventral. Se evidencia además piloerección generalizada, desde la línea media dorsal hasta la porción distal de la cola, lo cual incrementa visualmente el tamaño corporal, un mecanismo adaptativo típico ante estímulos percibidos como amenazantes.

C. Posición de repliegue corporal con inclinación cefálica y resguardo de áreas vulnerables como el cuello, abdomen y miembros pélvicos. El aplanamiento de las orejas y la midriasis marcada (dilatación pupilar) reflejan un alto grado de activación simpática, indicativa de un estado emocional de miedo intenso, dolor o estrés agudo.

La expresión facial se reconoce como una herramienta comunicativa multimodal, con implicaciones fisiológicas (como reflejo del estado emocional interno) y sociales (como señal hacia otros individuos), observable en diversas especies de animales no humanos. (Csoltova y Mehinagic, 2020b). De acuerdo con la teoría de Darwin (1872), los animales no humanos pueden comunicar sus emociones mediante cambios en la expresión facial (Lezama-García *et al.* 2019; Mota-Rojas *et al.* 2021; Zimmermann *et al.* 2024). Las expresiones faciales son resultado de la contracción –o relajación– de músculos faciales o miméticos (Mota-Rojas *et al.* 2023, 2025). Dichas contracciones musculares crean surcos, líneas y pliegues en la piel que culminan en movimientos de la musculatura alrededor de los ojos, boca, nariz, orejas y vibrisas y, con ello, en cambios en la expresión facial (Kaminski *et al.* 2019; Severson *et al.* 2019; Domínguez-Oliva *et al.* 2023). Especies altamente sociales como los perros (Waller *et al.* 2013), caballos (Wathan *et al.* 2015b), gatos (Caeiro *et al.* 2013), primates no humanos (Caeiro *et al.* 2013; Julle-Danière *et al.* 2015). Macaca mulatta, entre otros, han sido profundamente estudiadas a través del Sistema de Codificación Facial para Animales (AnimalFACS), el cual codifica movimientos musculares específicos o (UAF). En aquellas especies que carecen de AnimalFACS, existen escalas de valoración facial que permiten reconocer estados emocionales específicos como ansiedad (Davies *et al.* 2016), o estados fisiológicos negativos como el dolor (Cohen y Beths, 2020).

La importancia actual de la expresión facial en los animales domésticos está relacionada al vínculo que desarrollan entre congéneres o miembros de diferente especie y a la necesidad de comunicación entre ambos (Lezama-García *et al.* 2019). Un ejemplo de ello es la interacción entre perros y humanos, donde posiblemente la expresión facial es influenciada por el proceso de domesticación (Kaminski *et al.* 2017). A pesar de que la evidencia empírica sobre las expresiones faciales en animales como indicadores emocionales es limitada (Gähwiler *et al.* 2020), se ha planteado que ciertos patrones faciales pueden ser indicadores útiles para identificar el estado afectivo de los animales frente a un evento (Mota-Rojas *et al.* 2021). En el caso de eventos como acicalamiento (con cepillos mecánicos o manuales) o anticipación positiva, la expresión facial de bovinos y equinos se caracteriza por ojos entrecerrados y orejas colgando o apuntando hacia caudal. Por el contrario, el parpadeo frecuente, aplanamiento de las orejas y tensión en los músculos faciales se asocia a miedo y ansiedad (Bremhorst *et al.* 2019a; Hernández-Avalos *et al.* 2021; Farghal *et al.* 2024).

En animales también se han adaptado Sistemas de Codificación Facial (FACS) con el objetivo de analizar los movimientos faciales usando los músculos del rostro como base anatómica (Krause *et al.* 2021). Las especies en las que se han adaptado las FACS son en caballos, gatos, perros, chimpancés, gibones, macacos y orangutanes (Domínguez-Oliva *et al.* 2024). Debido a que cada especie puede mostrar una expresión facial distinta, el presente artículo analizará la neurobiología de las emociones en animales domésticos, y las expresiones faciales características de emociones positivas durante el acicalamiento o anticipación positiva, y a emociones negativas como miedo y ansiedad. De igual forma, se abordará el dolor como un estado negativo y los principales cambios en la expresión facial.

Neurobiología de las emociones

El concepto de emoción sugiere que éstas tienen la función de regular las respuestas conductuales y fisiológicas de un animal ante distintos eventos ambientales o sociales (Mota-Rojas *et al.* 2020; Mota-Rojas *et al.* 2021). Debido a ello, los estados afectivos negativos y positivos dependen de la integración, coordinación y comunicación de cada uno de los componentes cerebrales y nerviosos necesarios para cada reacción secundaria (Waller y Micheletta, 2013; Malezieux *et al.* 2023; Mota-Rojas *et al.* 2023). Por ejemplo, durante el miedo participan regiones como el tálamo, amígdala e hipotálamo en la respuesta simpática (Levine, 2008).

De manera general, las emociones se procesan en el complejo límbico del cerebro, el cual almacena neuronas especializadas que se comunican con una de las principales regiones moduladoras de las emociones, la amígdala (Phelps y LeDoux, 2005). La amígdala desempeña diversas funciones como la regulación de emociones y respuestas motoras, así como la gestión del dolor (Baxter y Croxson, 2012). De forma específica, las áreas lateral y/o basolateral de la amígdala procesan la información sensorial proveniente del tálamo e hipocampo (Fendt y Fanselow, 1999; Keifer *et al.* 2015).

Las respuestas fisiológicas y conductuales en respuesta a una emoción activan una compleja red de centros sensoriales en regiones como el gris periacueductal, *locus coeruleus*, núcleo parabraquial, corteza insular posterior, núcleo *accumbens* y pálido ventral, entre otros (Ho y Berridge, 2014; Liu *et al.* 2017; Jhang *et al.* 2018; Gehrlach *et al.* 2019). Entre ellos destacan circuitos como el formado por la corteza cingulada anterior, el hipocampo y la amígdala basolateral, implicados en el reconocimiento y contextualización de estímulos, especialmente durante estados de miedo en entornos desconocidos (Ortiz *et al.* 2019).

Asimismo, el procesamiento del riesgo ante una amenaza involucra la actividad sincronizada de estructuras como el núcleo del lecho de la estría terminal, hipocampo ventral, corteza prefrontal medial y amígdala basolateral. Cuando el umbral de amenaza se percibe como inminente, se incrementa la excitación neuronal. Esto fue reportado por Kennedy *et al.* (2020), quienes mostraron un incremento en la actividad neuronal eléctrica y la densidad de neurotransmisores (proteína receptora nuclear NR5A1 (SF1)) en la matriz extracelular de las subdivisiones dorsomedial y ventromedial del hipotálamo de ratones expuestos a depredadores, cambio que persiste hasta 15 segundos.

Por otro lado, la neurociencia afectiva ha identificado múltiples estructuras límbicas y extra límbicas en la codificación de emociones positivas. El placer, por ejemplo, activa zonas como la corteza orbitofrontal, el núcleo *accumbens*, la corteza insular, la corteza cingulada anterior, el pálido ventral y la amígdala. Estas áreas se convierten en “puntos calientes” durante la experiencia de sabores agradables, generando expresiones faciales asociadas al disfrute en humanos, ratas y primates (Berridge y Kringelbach, 2015). Sin embargo, aún se desconoce cómo estas estructuras organizan e integran una emoción positiva a partir de estímulos sensoriales (Berridge y Kringelbach, 2008).

De este modo, el cerebro muestra una notable capacidad de sinergia y antagonismo funcional. Algunas regiones pueden simultáneamente motivar o inhibir una emoción. Por ejemplo, en ratones, la corteza prelímbica promueve respuestas de lucha, mientras que la infralímbica las suprime. Esta dinámica depende de la interacción entre conexiones neuronales y la diversidad de neurotransmisores y receptores (Malezieux *et al.* 2023), lo que plantea un desafío para la neurociencia afectiva: incluso ante la pérdida completa de ciertas regiones cerebrales, las emociones complejas como el miedo o el placer pueden seguir emergiendo. En este sentido, Antoniadis *et al.* (2007) investigaron el papel de la amígdala y el hipocampo en monos Rhesus durante la adquisición del miedo aprendido con sobresalto. Después de realizar una lesión bilateral del complejo amigdaloides e hipocampo mediante ácido iboténico, los autores observaron que la lesión bloqueó la respuesta de miedo. En una segunda fase, los mismos autores reportaron que, a pesar de la lesión completa de la amígdala, los animales expresaron sobresalto potenciado por el miedo, lo cual indica retención y expresión de la emoción. Estos hallazgos sugieren que, ante la falta de cualquier región, otras estructuras participan para regular el estado emocional y garantizar la respuesta adecuada ante una situación específica. Otro ejemplo es lo observado con la expresión de dolor agudo, donde se involucra la respuesta del hipocampo, hipotálamo, tálamo y corteza somatosensorial (Ellison, 2017; Bell, 2018).

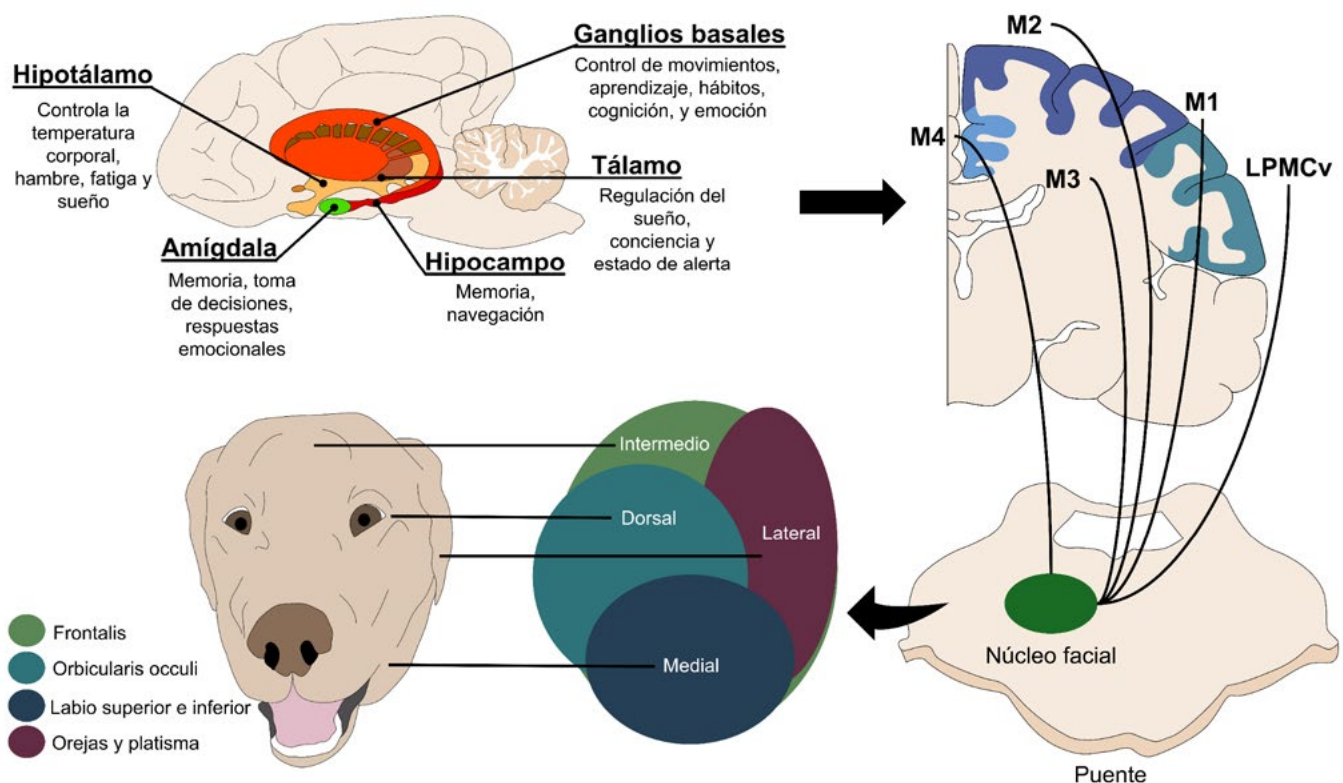
Las emociones básicas están programadas para expresarse a través de ajustes conductuales como las expresiones faciales, ya que cumplen un papel social fundamental al permitir la interpretación de estados emocionales (Mota-Rojas *et al.* 2023). Por esta razón, se asocian a los centros emocionales con rutas nerviosas dirigidas hacia los músculos del rostro para generar contracciones musculares y, en consecuencia, cambios en la expresión facial (Dolensek *et al.* 2020; Correia-Caeiro *et al.* 2021; Zych y Gogolla, 2021).

Estas rutas implican al nervio facial (VII), cuya inervación se origina en el núcleo motor facial del tronco encefálico. En primates no humanos, se ha identificado una organización topográfica en la corteza motora, donde áreas como la corteza motora suplementaria (M2) y cingulada rostral (M3) controlan la musculatura facial superior. En contraste, la corteza motora primaria (M1), la premotora lateral ventral (LPMCV) y la motora cingulada caudal (M4) regulan la porción inferior (Morecraft *et al.* 2004). Además, en especies como el mono rhesus, se ha observado que estas áreas corticales modulan regiones faciales específicas: M2 regula los músculos auriculares, M3 los oculares y M1, M4 y LPMCV los periorales (Morecraft *et al.* 2001) (Figura 2). La dimensión funcional del núcleo facial varía entre especies, dependiendo de la relevancia conductual de ciertos músculos. Por ejemplo, en ratones, el 43% de las neuronas del núcleo facial se proyectan a la región naso-labial, en correlación con el volumen muscular de dicha zona, lo que sugiere una relación proporcional entre la cantidad de fibras musculares y las conexiones neuronales que las controlan (Tsai *et al.* 1993).

El núcleo motor facial también recibe proyecciones de centros emocionales superiores como la amígdala, núcleo *accumbens*, pálido ventral y corteza orbitofrontal e insular. Estas áreas participan de forma diferencial según la valencia emocional, como se ha observado en neonatos y animales al

experimentar placer o disgusto ante estímulos gustativos (Berridge y Kringelbach, 2015). Expresiones similares se han documentado en caballos y perros durante situaciones de frustración alimentaria, lo que sugiere un mecanismo emocional conservado (Caeiro *et al.* 2017; Ricci-Bonot y Mills, 2023).

Figura 2. Neurobiología de las expresiones faciales en perros domésticos



Se esquematiza la organización topográfica de las conexiones directas entre la corteza motora y el núcleo facial. Cada tallo coordina el movimiento de distintos sectores en el rostro. Por ejemplo, la corteza motora suplementaria (M2) y cingulada rostral (M3) comandan la inervación de la musculatura facial superior. Por el contrario, la musculatura facial inferior está dominada por la corteza motora primaria (M1), la corteza premotora lateral ventral (LPMCv) y la corteza motora cingulada caudal (M4).

Estudios con imágenes neuronales y estimulación eléctrica intracerebral muestran que la amígdala y otras estructuras del prosencéfalo activan directamente la musculatura facial en respuesta a emociones como el miedo, evidenciando una jerarquía funcional superior en la generación de estas respuestas (Gomes *et al.* 2023; Morecraft *et al.* 2004). Finalmente, estructuras como el tálamo y la sustancia gris periacueductal (PAG) participan integrando señales sensoriales, motoras y emocionales, reforzando la noción de que las expresiones faciales son el resultado de una red cerebral compleja y jerárquicamente organizada (Bress y Cascio, 2024).

Expresiones faciales en estados emocionales positivos

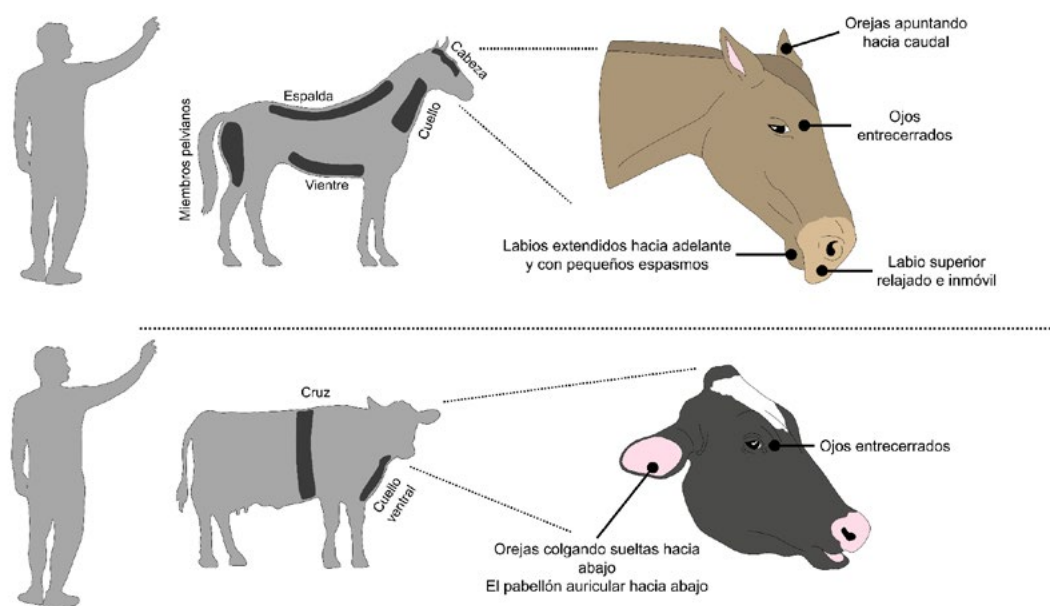
El estudio de las emociones en animales ha llevado a asociar determinadas expresiones faciales a eventos positivos como estimulación táctil, interacción humano-animal positiva y juego. En el caso de animales domésticos, las expresiones faciales en un contexto positivo se han identificado en la gran mayoría de especies debido a su cercanía con los humanos y a la importancia que tienen para la comunicación animal (Mota-Rojas *et al.* 2020; Mota-Rojas, 2023). No obstante, a diferencia de emociones negativas como miedo o ansiedad, los estados emocionales positivos han recibido menos atención debido a que suelen presentarse de manera más sutil y pueden ser difíciles de diferenciar de otras emociones (Csoltova y Mehinagic, 2020b).

De manera particular, en el caso de caballos, el estudio de las expresiones faciales se ha enfocado a reconocer cómo es que los animales perciben un evento o estímulo, sea positivo o negativo. Un ejemplo de ello es la estimulación táctil, ya sea mediante caricias con la mano o a través de cepillos mecánicos. La estimulación táctil en animales se ha reconocido como un medio para alentar estados mentales positivos ya que simula la necesidad biológica por el acicalamiento y aloacicalamiento (Hodgson *et al.* 2024; Mota-Rojas *et al.* 2024). Además, estudios refieren que puede evocar placer en los animales (Schirmer y McGlone, 2022). Esto fue estudiado por Hintze *et al.* (2016) al exponer a caballos machos y hembras de tres razas (Francés-montañés, sangre caliente y trotter) a estímulos positivos: 1) caricias con la mano en la zona del hombro y cuello; y 2) recompensa en forma de comida (mezcla de manzanas con zanahorias). Los cambios en la expresión facial se enfocaron en el número y notabilidad de pliegues perioculares debido a la contracción del músculo occipitofrontal (movimiento conocido como elevador de las cejas), la forma del párpado, visualización del blanco de los ojos y el ángulo entre la línea que pasa por el globo ocular y el pliegue más alto. Al analizar las fotos y compararlas con la expresión facial de caballos expuestos a estímulos negativos (p. ej., competencia por comida), los autores reportaron una interacción entre el ángulo ocular estrecho y las caricias. Estos resultados indican la relajación del músculo occipitofrontal frente a las caricias, por lo cual, este signo puede asociarse a un estado afectivo positivo.

De igual manera, Lansade *et al.* (2022) estudió el efecto que el uso de cepillos mecánicos tiene en la expresión facial y comportamiento de ponis galeses hembras. Los resultados mostraron que el 90% de los equinos emplearon los cepillos automáticos en zonas de difícil acceso para ellos (p. ej., la cabeza).

Además, el uso de los cepillos se reflejó en una expresión facial caracterizada por un cuello levemente elevado, ojos abiertos o parcialmente cerrados, extensión del labio superior y orejas giradas hacia caudal, casi alineadas con la nariz. Un dato adicional fue que, al realizar esta expresión facial, el 25.7% de los animales realizaron aloacicalamiento a un congénere. Resultados similares fueron obtenidos por el mismo grupo de investigación, quienes emplearon la estimulación táctil a través de cepillado gentil a yeguas galesas (Lansade *et al.* 2018). Al comparar las expresiones faciales del grupo que recibió el cepillado con aquellos en el grupo control, los del cepillado se caracterizaron por orejas apuntando hacia caudal, ojos parcialmente cerrados, labios extendidos hacia el frente y con espasmos o el labio superior inmóvil y cuello levemente elevado (Lansade *et al.* 2018) (Figura 3).

Figura 3. Expresión facial de bovinos y equinos frente a un estímulo positivo



El acicalamiento a animales domésticos, a través de las caricias a determinadas regiones corporales, se considera un evento placentero para los animales en los que se observan cambios en la expresión facial. En el caso de los equinos, una expresión asociada al estímulo positivo se caracteriza por ojos entrecerrados, orejas apuntando hacia caudal, labios extendidos hacia adelante y un labio superior relajado e inmóvil. En vacas, un pabellón auricular colgante y ojos entrecerrados son signos indicativos de estado mental positivo.

Los movimientos musculares previamente mencionados (o UAF), son actualmente estudiados de manera objetiva a través del sistema de codificación facial para equinos (EquiFACS) (Rashid *et al.* 2020). Aunque EquiFACS no describe expresiones faciales, ayuda a reconocer los músculos que participan en cada UAF. Por ejemplo, el movimiento de orejas se asocia al músculo *frontoscutularis* e *interscutularis*, el control ocular al *orbicularis oculi* y *corrugator supercilii*, la relajación de los músculos faciales al *zygomaticus* y los cambios en la región perioral al *orbicularis oris* y *levator labii superioris* (Wathan *et al.* 2015a).

Dalla Costa *et al.* (2017) también emplearon caricias con la mano en la cruz de caballos machos y hembras de distintas razas para identificar los cambios en la expresión facial, usando la escala de dolor equina (HGS, por sus siglas en inglés). Aunque la HGS fue diseñada específicamente para identificar dolor durante procedimientos quirúrgicos (p. ej., castración) o procesos patológicos (p. ej., cólico equino y claudicación) (Dalla Costa *et al.* 2014), se ha empleado para reportar la influencia que el estado emocional tiene en la presentación de ciertas UAF. Por ejemplo, el proveer caricias y recompensas nutricionales a caballos generaron puntuaciones menores a dos. Asimismo, se registró que UAF como orejas rígidas hacia atrás y músculos masticatorios prominentes y tensos no son característicos de un estado mental positivo. En otro estudio realizado durante sesiones de refuerzo positivo, los siguientes cambios faciales de yeguas de raza mixta se observaron con mayor frecuencia: incremento del blanco de los ojos (1.9 ± 0.6), tirador de la comisura labial (0.33 ± 0.2), elevación del mentón (4.8 ± 1.8), fruncimiento y elevación del labio superior (4.2 ± 1.5 y 3.0 ± 1.6), caída de la mandíbula (0.7 ± 0.9), orejas hacia adelante (3.2 ± 1.5), inclinación de la cabeza hacia la derecha (0.3 ± 0.1), y movimientos de nariz atrás/adelante (2.8 ± 0.7 y 1.3 ± 0.3) (Carmo *et al.* 2023).

De esta manera, en equinos se menciona que la expresión facial, al contrario de los indicadores conductuales, es un método más sensible para diferenciar emociones (Lansade *et al.* 2018). Por ello, estudios recientes se han enfocado en desarrollar herramientas para la detección automática de expresiones faciales y, en consecuencia, del estado emocional. Dichas herramientas han alcanzado hasta un 76% de exactitud en diferenciar emociones positivas (anticipación) de negativas (decepción y frustración) (Feighelstein *et al.* 2025).

En el caso de los rumiantes, de manera rutinaria, la ausencia de enfermedad, el buen crecimiento y la productividad se consideran indicadores de bienestar (Barrell, 2019). No obstante, poder vincular la expresión facial de un animal con un estado emocional es trascendental para una aplicación práctica puesto que la mayoría de los animales de granja son capaces de modificar su expresión facial ante diferentes eventos (Neethirajan *et al.* 2021). Un indicador facial de gran relevancia en rumiantes es la posición de las orejas (Lambert y Carder, 2019). Los rumiantes, tienen músculos altamente desarrollados en las orejas (cigomático auricular y parótido auricular), lo cual les confiere el movimiento de manera independiente. En las vacas lecheras, ovejas y cabras, las orejas colgantes o hacia atrás suelen asociarse con estados emocionales positivos inducidos por caricias o acicalamiento (Battini *et al.* 2019), en conjunto

con mantener los ojos entrecerrados (Neethirajan *et al.* 2021). Así mismo, la apertura del ojo suele disminuir hasta un 67.8% cuando la excitación es baja ante caricias (Battini *et al.* 2019).

En distintos estudios se ha documentado que el porcentaje de blanco del ojo es menor ante emociones positivas de baja excitación, como el realizado por Proctor y Carder (2015). En este estudio se emplearon 13 vacas lecheras a las cuales se les emuló el acicalamiento acariciándolas en la cruz, frente, cuello y mejillas mientras se realizaba un muestreo focal de 3 tiempos. Los resultados mostraron una disminución del 6% en el porcentaje del blanco del ojo visible durante las caricias, en comparativa al antes y después de éstas.

Así mismo, el estudio de Battini *et al.* (2019) investigó si el porcentaje de blanco del ojo y la postura de las orejas se podían relacionar con emociones positivas en vacas de cinco producciones lecheras al norte de Italia en diferentes contextos (alimentación, descanso, pastoreo y prueba de distancia del comedero). Los resultados obtenidos mostraron una relación directa con un mayor porcentaje de ojos semicerrados, mismo que fue asociado con una baja excitación y una experiencia positiva con el pastoreo (67.8%), seguido del descanso (45.3%<) y la alimentación (41.9%). De igual forma, la posición de las orejas durante estos eventos se mantuvo hacia delante. Estos resultados muestran que las vacas usan de manera simultánea distintos cambios en la expresión facial para comunicar emociones, siendo así indicadores prometedores para la evaluación emocional de los rumiantes.

En animales de compañía, aunque diversos autores destacan el rol que la expresión facial tiene para comunicar su estado mental a los propietarios, su estudio se limita en gran medida a eventos negativos (p. ej., miedo, frustración, ansiedad, agresión) (Siniscalchi *et al.* 2018; Csoltova y Mehinagic, 2020b; Mota-Rojas *et al.* 2021). No obstante, entre los estudios que emplean estímulos positivos en perros (presencia del tutor), Nagasawa *et al.* (2013) resalta un efecto de lateralización en el cual los perros reaccionan con movimientos de la ceja izquierda al reencontrarse con el tutor. Esto puede asociarse al control del hemisferio izquierdo sobre emociones positivas como felicidad o sorpresa (Root *et al.* 2006). Asimismo, en la misma especie, Correia-Caeiro *et al.* (2021) reportó cambios en la expresión facial de 92 perros a quienes se les mostraron videos de congéneres expresando emociones positivas y negativas (miedo, felicidad, anticipación positiva y frustración). En estos animales, el observar los videos de congéneres incrementó la frecuencia con la que las orejas se acercan a la cabeza, lo cual se asocia a una respuesta positiva al ver a otros perros (Caeiro *et al.* 2017; Bremhorst *et al.* 2019b). Adicionalmente, el levantamiento de las mejillas y la contracción de los músculos alrededor de los ojos se considera una “expresión alegre” tanto en perros como en humanos (Correia-Caeiro *et al.* 2021).

Por otro lado, aunque no se considera una expresión facial sino un descriptor de acción facial en perros —el cual no especifica una base muscular, pero reconoce el movimiento en específico—, se ha estudiado el lamido de labios y nariz durante la exposición a estímulos negativos y positivos (expresiones faciales alegres de congéneres y humanos). En un estudio de Albuquerque *et al.* (2018) se reportó una baja frecuencia de lamido de labios frente a estímulos positivos (0.093 ± 0.034), en contraste de lo ob-

servado durante eventos negativos (0.196 ± 0.034). De igual manera, el descriptor facial “levantador de las orejas” se observó comúnmente durante anticipación positiva (Bremhorst *et al.* 2019b). De manera similar a los perros, el descriptor facial “levantador de orejas” se ha asociado a una expresión de relajación e interés en gatos domésticos expuestos a estímulos positivos (Bennett *et al.* 2017). En dicho estudio, la interacción humana a través de caricias fue empleada como estímulo positivo.

En gatos domésticos, al igual que en perros, la mayoría de los estudios se enfocan a evaluar la expresión facial durante eventos negativos (p ej., dolor). No obstante, Scott y Florkiewicz (2023) han reportado alrededor de 276 distintos signos faciales durante interacciones sociales con otros gatos y con humanos. En particular, ocho movimientos faciales se asocian a eventos afiliativos y no afiliativos. En el caso de eventos afiliativos, la expresión facial se caracteriza por la aducción de las orejas y su movimiento hacia adelante (*frontoscutularis* e *interscutularis*), bigotes hacia adelante (*levator nasii*) y ojos cerrados (*orbicularis oculi* y *levator palpebrae*).

Finalmente, estudios han mostrado que los animales no sólo son capaces de mostrar expresiones faciales asociadas a emociones positivas, sino que también son capaces de identificarlas en congéneres y otras especies. Esto se ha observado en caballos hembra y macho de las razas Merseyside, Sussex, y Surrey a quienes se les presentaron fotografías de expresiones faciales positivas, relajadas y agonísticas (Wathan *et al.* 2016). El 100% de los caballos se acercó y mostró mayor atención hacia las fotografías con una expresión facial positiva y el 80% hacia las de relajación. Asimismo, el reconocimiento de un estado mental positivo a través de la expresión facial se ha observado entre humanos y animales, como lo reportado en caballos por Trösch *et al.* (2019). En dicho estudio, yeguas galesas respondieron a videos de personas expresando enojo y felicidad. Los resultados mostraron que el 10% de las veces que las yeguas miraron los videos, mostraron una postura corporal relajada (músculos del cuello relajados, cabeza baja y el ángulo de la cruz mayor a 165°). Esto demuestra que las expresiones faciales pueden ser percibidas y utilizadas como indicadores de estados emocionales incluso por diferentes animales. Por ello, el comprender cómo se identifican y cómo se propagan dentro de un grupo social puede tener un gran impacto para mejorar el bienestar de diversas especies (Bellegarde *et al.* 2017).

Expresiones faciales en estados emocionales negativos

Los estados emocionales negativos, a diferencia de los estados emocionales positivos como el placer o el juego se encuentran influenciados por una actividad neurobiológica diferente. De acuerdo con la teoría propuesta por Darwin (1872), el manifestar una emoción cumple con tres funciones fundamentales: adaptar a un animal a un estímulo ambiental, comunicar la emoción y posiblemente contribuir al surgimiento de otra emoción. Con base a esta teoría, los estados negativos preparan al organismo para una situación ambiental adversa como puede ser la lucha por territorio, por alimento o frente a estados que pueden generar miedo (Spunt *et al.* 2017; Coria-Avila *et al.* 2022).

La expresión facial asociada al miedo tal vez es una de las condiciones que se ha estudiado de manera amplia en animales debido al impacto que éste tiene en el nivel de bienestar y en el rendimiento productivo de los mismos (Grandin, 2018; Mota-Rojas *et al.* 2024). La respuesta al miedo ha sido evaluada en vacas lecheras bajo pruebas de distancia de evitación en el comedero (Battini *et al.* 2019). En dicho estudio se observó que la prueba de evitación ocasionó que los animales exhibieran el blanco del ojo en un 44.8% y en un 95.5% de los casos posicionaran las orejas dirigidas hacia el evaluador.

La apertura ocular se asocia a la respuesta del sistema nervioso simpático (SNSi) a un estímulo amenazante como un depredador o un extraño en territorio propio (Lezama-García *et al.* 2019; Mota-Rojas *et al.* 2023). El incremento de la actividad del SNSi, y la consecuente secreción de catecolaminas, estimulan las fibras adrenérgicas presentes en los nervios ciliares cortos que inervan el músculo dilatador del iris (Rollins *et al.* 2014; Kim *et al.* 2015). El efecto de esta respuesta es el incremento del diámetro de la pupila como se muestra en la Figura 4 en gatos, donde se ejemplifica como un animal durante una potencial amenaza (visita médica) puede ocasionar el incremento del tamaño de la pupila. Esto permite mayor entrada de luz ambiental, facilitando la vigilancia ante alguna amenaza (Mathôt, 2018; Nicholson y O'Carroll, 2021).

Figura 4. Expresión facial de felino doméstico asociada al miedo



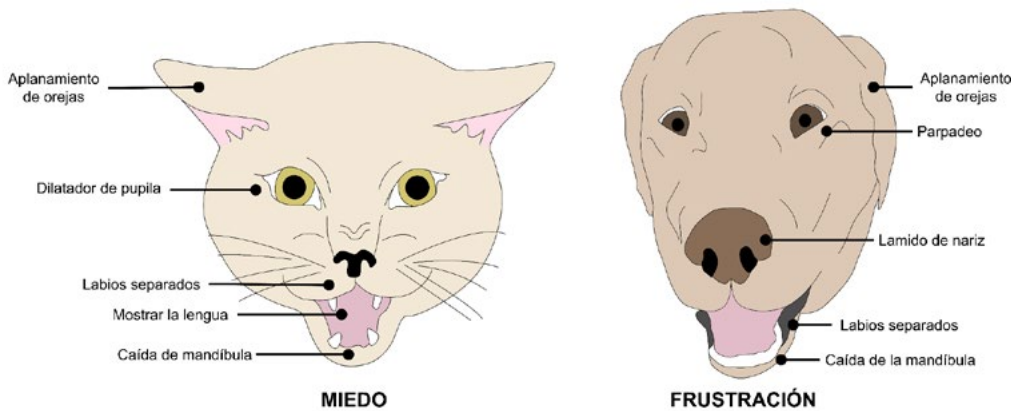
La fotografía muestra a un felino macho de 4 años que muestra una expresión facial asociada a miedo debido a una consulta médica. Es posible resaltar la apertura de los párpados, dilatación pupilar y el aplanamiento de las orejas.

Además de la apertura ocular, en vacas, la posición de las orejas se considera otro indicativo del estado afectivo de los animales. En este sentido, Marchado *et al.* (2023) evaluaron la asociación entre las posiciones de orejas –y cola– en vacas lecheras de acuerdo frente a un estímulo negativo: el abrir repentinamente una sombrilla frente al animal. Al evaluar el antes y después del estímulo, se encontró que las orejas se mantuvieron en una posición horizontal con una frecuencia de 0.75. Resultados similares fueron reportados por Lambert y Carder (2019), quienes usaron el paradigma de contraste positivo y negativo en 22 vacas lecheras Holstein para determinar si la posición de las orejas puede ser usada como un indicador del estado emocional. Sus observaciones indicaron que las orejas aplanadas hacia atrás se asociaron a estímulos negativos como frustración debido al ofrecimiento de alimento desagradable para el animal. En resumen, durante estados emocionales negativos, se busca la priorización de los sentidos de visión y audición para percibir las amenazas. Por ello, se observan cambios en ambas regiones.

En cerdos, Camerlink *et al.* (2018) diferenciaron las expresiones faciales de cerdos durante un evento agonístico (agresión). Entre los principales cambios se registró que el tamaño de los ojos en animales incitadores de la agresión fue mayor (1.05 ± 0.003) que aquellos que recibieron la agresión (0.99 ± 0.03). Además, se observó un incremento de la proporción del hocico durante la agresión (pre agresión= 1.8 *vs.* agresión= 2.1). Esto posiblemente confirma que las expresiones faciales comunican el estado emocional de los animales, que, incluso pueden vincularse con la intención de dicho estado para emitir una respuesta adecuada. En equinos, Lundbland *et al.* (2021) evaluaron la frecuencia de movimientos faciales y la respuesta fisiológica de 28 caballos transportados en remolque durante 6 horas bajo dos condiciones: en aislamiento y en compañía. Durante el aislamiento, los autores observaron un incremento del 30% en la frecuencia de presentación del blanco de los ojos, dilatación de fosas nasales, elevación del párpado superior, posición de las orejas y parpadeo. Esto fue precedido en ambas condiciones por el incremento de la frecuencia cardíaca en 53 latidos por minuto. Dichos resultados muestran que la expresión facial es un reflejo del estado mental del animal frente a situaciones potencialmente estresantes como el transporte (Reid *et al.* 2017; Zablocki-Thomas *et al.* 2022).

En perros, la apertura ocular fue evaluada por Burza *et al.* (2022), quienes investigaron la capacidad humana para el reconocimiento de emociones básicas como el miedo en perros. Los participantes asignaron una emoción al animal a partir de la observación de fotografías de expresiones faciales de tres razas de perros (pastor belga, crestado rodesiano y dóberman). Los resultados mostraron que una mayor exposición del blanco de los ojos se asoció a miedo (Figura 5). Por otra parte, Gähwiler *et al.* (2020) asoció el aplanamiento de orejas hacia atrás a la respuesta de miedo en perros expuestos a videos de fuegos artificiales (tamaño de efecto Cohen= 0.69). Además, otros descriptores de acción facial como el jadeo y parpadeo aumentaron un 60%.

Figura 5. Expresiones faciales durante la percepción de emociones negativas en animales de compañía.



La imagen del lado izquierdo muestra los indicadores faciales de miedo en un felino doméstico. Por otra parte, la imagen de la derecha resalta los indicadores de una cara de frustración en caninos domésticos.

En la misma especie, Bremhorst *et al.* (2019b) analizaron la expresión facial de 28 perros expuestos a frustración mediante la expectativa de recompensas alimenticias y juguetes. Durante la condición negativa, aumentó la frecuencia de indicadores como parpadeo, aplanamiento de las orejas (orientadas hacia atrás), separación de los bellos, caída de la mandíbula y lamido de la nariz. Los autores argumentaron que el aplanamiento auricular ha sido previamente vinculado con algunas emociones de valencia negativa, incluyendo la ansiedad, por lo que podría representar un indicador prometedor para la evaluación de esta emoción. No obstante, también destacaron que la evidencia empírica que relaciona de manera directa esta expresión con estados emocionales específicos aún es limitada.

Similarmente, Ellis (2018) describe que algunos gatos, cuando enfrentan ansiedad aguda o estímulos generadores de miedo, tienden a aplanar las orejas hacia abajo. Sin embargo, también se menciona que pueden mostrar signos de hipervigilancia, como las orejas erguidas o en movimiento siguiendo la fuente de sonido, por lo cual es crucial conocer a la especie para identificar correctamente los cambios en la expresión facial.

Dolor

El dolor es una condición adversa que, de acuerdo con la Asociación Internacional del estudio del dolor (IASP), implica componentes emocionales y sensoriales desagradables asociados a un daño tisular real o potencial (Raja *et al.* 2020). Es un evento que puede generar estados negativos como miedo, ansiedad o frustración (Monteiro *et al.* 2022).

El dolor se asocia a respuestas emocionales debido a que, posterior a que los estímulos nocivos son reconocidos por la corteza cerebral (Lamont *et al.* 2000; Ellison, 2017; Bell, 2018), el tálamo, uno de los centros integradores del dolor, mantiene conexiones con la amígdala (Purves *et al.* 2001; Afifi y Bergman, 2006). Debido a estas interconexiones presentes en la amígdala, se produce la coordinación de respuestas motoras cuando se percibe dolor agudo, incluidos los cambios en la expresión facial (Fendt y Fanselow, 1999). Esto produce la contracción de músculos como el *frontalis* medial y el *corrugador superciliar*, facilitando expresiones asociadas al dolor, como la elevación del labio inferior, la extensión de las comisuras labiales o el fruncimiento de los labios (Berridge y Kringelbach, 2015; Gomes *et al.* 2023).

Las características faciales asociadas al dolor se han descrito en distintas especies, por ejemplo, en bovinos, equinos, ovinos, porcinos, felinos, roedores y conejos (Gleerup *et al.* 2015; Mogil *et al.* 2020; Mota-Rojas *et al.* 2020; Benato y Rooney, 2022). En caballos adultos expuestos a estímulos nocivos como un torniquete en el antebrazo y la aplicación tópica de capsaicina, Gleerup *et al.* (2015) describieron la expresión facial de dolor. Los autores observaron en ambos casos que la frecuencia de movimientos como posición asimétrica de las orejas, dilatación de las fosas nasales, tensión de los labios y tensión de los músculos orbitales aumentaron de forma significativa en un 50% en comparación con su ensayo control.

Aunque los cambios dependen en gran medida de la especie, existen similitudes en los indicadores faciales de dolor. Por ejemplo, al comparar gatos, ratones y ratas, es posible observar que su expresión se caracteriza por el aplanamiento de las orejas, la tensión orbital y la tensión de los bigotes (Leach *et al.* 2012; Evangelista *et al.* 2019; Domínguez-Oliva *et al.* 2023;). Estos últimos cambios se explican por la contracción de los músculos *levator nasolabialis* (Caeiro *et al.* 2017; Domínguez-Oliva *et al.* 2022; Mota-Rojas *et al.* 2025). El reconocimiento de la expresión facial asociada a la percepción de dolor agudo ha llevado al desarrollo de escalas de dolor (o Grimace Scales) en equinos (Dalla Costa *et al.* 2014), rumiantes (Gleerup *et al.* 2015), felinos domésticos (Evangelista *et al.* 2019) y en animales de laboratorio (Benato y Rooney, 2022; Domínguez-Oliva *et al.* 2022; Mogil, 2022). Estas escalas describen UAF distintivas en las especies y otorgan un puntaje para evaluar el grado de dolor de manera objetiva. En el caso de los perros domésticos, a la fecha no existe una escala de evaluación de dolor (Mota-Rojas *et al.* 2021). No obstante, Casas Alvarado *et al.* (2025) sugieren que una expresión facial en perras sujetas a ovariectomía se caracteriza por la presencia de parpadeo, tensión de la comisura labial, tensión

de los párpados y tensión de los labios (Figura 6). Por consiguiente, las respuestas emocionales del dolor son un campo en el que el estudio de la expresión facial es crucial como método no invasivo para evaluar el grado de dolor agudo, considerando la especie y a las características anatómicas.

Figura 6. Paciente con expresión facial de dolor leve evaluado mediante escalas de reconocimiento clínico



DIVAS= 40 puntos

UMPS= 7 puntos

GCMPS= 4 puntos

Durante el postoperatorio de una ovariectomía. Nótese la tensión de los párpados, la tensión de los labios, el posicionamiento de las orejas y el encorvamiento leve, a pesar de que no manifiesta hipertensión o taquicardia. DIVAS= escala dinámica interactiva visual analógica. UMPS= escala de evaluación del dolor de la Universidad de Melbourne. GCMPS= escala de evaluación y manejo del dolor de la Universidad de Glasgow, versión corta.

Perspectivas

Una de las principales limitantes y retos del estudio en torno a la expresión facial son las diferencias anatómicas entre especies (Waller *et al.* 2020). Por ejemplo, en el equino se describe que los músculos *parotido auricularis*, *zygomático auricularis*, *interscutularis* y *frontoscutularis* permiten el movimiento de las orejas hacia lateral, frontal y caudal. No obstante, estos músculos no se identifican en perros y gatos domésticos (Caeiro *et al.* 2013; Waller *et al.* 2013). Debido a ello, aunque la mayoría de las especies suele compartir un indicativo facial asociado a cierta emoción (p. ej., ojos entrecerrados frente a estímulos positivos) deben realizarse evaluaciones por especie y contexto.

Otro campo de investigación poco explorado es la aplicación de las escalas de dolor para evaluar emociones positivas o negativas. En este sentido, Farghal *et al.* (2024) observaron que las puntuaciones en la Escala de Dolor de Becerras (CGS) aumenta en situaciones que no están asociadas con dolor, como la estancia en un corral de espera o la separación de los terneros. La proporción de terneros que presentó cambios en la posición de las orejas aumentó del 40 al 75% tras el aislamiento. La tensión en el músculo masticador se incrementó del 90 al 100%, mientras que la tensión orbitaria mostró una reducción del 20% al 10%. Además, se observaron cambios en la dilatación de los orificios nasales en el 100% de los terneros evaluados. Estos hallazgos indican que, aunque aún no se han definido expresiones faciales específicamente asociadas al miedo o ansiedad en becerros, la CGS podría ser una herramienta prometedora para identificar emociones negativas distintas al dolor, como la ansiedad. Por otro lado, aún queda por determinar la influencia de la interacción humano-animal en el desarrollo de expresiones faciales, ya que en especies como los perros, la anatomía facial ha sido influenciada por el proceso de domesticación y para facilitar la comunicación con los humanos (Kaminski *et al.* 2019).

CONCLUSIONES

La evaluación de las emociones en animales, como parte de la estrategia para preservar el bienestar animal, requiere indicadores no verbales del estado afectivo de las especies. Las expresiones faciales son indicadores de suma importancia para comprender las emociones debido al mecanismo neurobiológico que liga una emoción con el control motor facial. Durante eventos como la anticipación positiva, acicalamiento y refuerzos nutricionales, algunos de los principales indicadores asociados a un estado mental positivo son la apertura ocular acompañada de levantamiento de cejas y cambios en la posición de las orejas, manteniendo una apariencia relajada en animales de granja y domésticos. Por el contrario, cuando los animales están expuestos a eventos negativos, los principales indicadores de miedo, ansiedad o frustración incluyen el aplanamiento y retracción de orejas, apertura inmediata de ojos, dilatación pupilar, tensión en el músculo masticatorio y dilatación de los orificios nasales. Adicionalmente, el

estudio de las emociones y la expresión facial ha llevado al desarrollo de escalas de dolor, las cuales caracterizan movimientos faciales con el fin de cuantificar el dolor. De esta manera, observar la expresión facial de los animales puede emplearse como un indicativo del estado mental (positivo o negativo) y del contexto en el que se desenvuelven los animales.

BIBLIOGRAFÍA

- Afifi, A., & Bergman, R. (2006). *Functional neuroanatomy* (2.^a ed.). McGraw-Hill.
- Albuquerque, N., Guo, K., Wilkinson, A., Resende, B., & Mills, D. S. (2018). Mouth-licking by dogs as a response to emotional stimuli. *Behavioural Processes*, 146, 42–45. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2017.11.006>
- Amici, F., Waterman, J., Kellermann, C. M., Karimullah, K., & Bräuer, J. (2019). The ability to recognize dog emotions depends on the cultural milieu in which we grow up. *Scientific Reports*, 9(1), 16414. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52938-4>
- Anderson, D. E., & Muir, W. W. (2005). Pain management in cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 21(3), 623–635. <https://doi.org/10.1016/j.cvfa.2005.07.002>
- Anderson, D. J., & Adolphs, R. (2014). A framework for studying emotions across species. *Cell*, 157(1), 187–200. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2014.03.003>
- Antoniadis, E. A., Winslow, J. T., Davis, M., & Amaral, D. G. (2007). Role of the primate amygdala in fear-potentiated startle: Effects of chronic lesions in the rhesus monkey. *The Journal of Neuroscience*, 27(28), 7386–7396. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5643-06.2007>
- Battini, M., Agostini, A., & Mattiello, S. (2019). Understanding cows' emotions on farm: Are eye white and ear posture reliable indicators? *Animals*, 9(8), 477. <https://doi.org/10.3390/ani9080477>
- Baxter, M. G., & Croxson, P. L. (2012). Facing the role of the amygdala in emotional information processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(52), 21180–21181. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1219167110>
- Bekoff, M. (2000). Animal emotions: Exploring passionate natures. *BioScience*, 50(10), 861–870. [https://doi.org/10.1641/00063568\(2000\)050\[0861:AEEP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/00063568(2000)050[0861:AEEP]2.0.CO;2)
- Bell, A. (2018). The neurobiology of acute pain. *The Veterinary Journal*, 237, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2018.05.004>
- Bellegarde, L. G. A., Haskell, M. J., Duvaux-Ponter, C., Weiss, A., Boissy, A., y Erhard, H. W. (2017). Face-based perception of emotions in dairy goats. *Applied Animal Behaviour Science*, 193:51–59. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2017.03.014>
- Benato, L., y Rooney, N. (2022). Bristol Rabbit Pain Scale (BRPS): Clinical utility , validity and reliability, *BMC Veterinary Research*, in review:1–15.

- Bennett, V., Gourkow, N., y Mills, D. (2017). Facial correlates of emotional behaviour in the domestic cat (*Felis catus*), *Behav Process*, 141:342–350.
- Berridge, K. C., y Kringelbach, M. L. (2008). Affective neuroscience of pleasure: reward in humans and animals, *Psychopharmacology*, 199(3):457–480. <https://doi.org/10.1007/s00213-008-1099-6>
- Bremhorst, A., Sutter, N. A., Würbel, H., Mills, D. S., y Riemer, S. (2019). Differences in facial expressions during positive anticipation and frustration in dogs awaiting a reward, *Scientific Reports*, 9(1):19312. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55714-6>
- Bress, K. S., y Cascio, C. J. (2024). Sensorimotor regulation of facial expression – An untouched frontier, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 162:105684. <https://doi.org/10.1016/J.NEUBIO-REV.2024.105684>
- Burza, L. B., Bloom, T., Trindade, P. H. E., Friedman, H., y Otta, E. (2022). Reading emotions in Dogs' eyes and Dogs' faces, *Behavioural Processes*, 202:104752. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2022.104752>
- Caeiro, C. C., Burrows, A. M., y Waller, B. M. (2017). Understanding feline feelings: An investigation of cat owners' perceptions of problematic cat behaviors, *Applied Animal Behaviour Science*, 189:66–78. <https://doi.org/10.1016/J.APPLANIM.2017.01.005>
- Caeiro, C., Guo, K., y Mills, D. (2017). Dogs and humans respond to emotionally competent stimuli by producing different facial actions, *Scientific Reports*, 7(1):15525. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15091-4>
- Caeiro, C., Waller, B., y Burrows, A. (2013). *The Cat Facial Action Coding System manual* (CatFACS).
- Caeiro, Cátia C., Waller, B. M., Zimmermann, E., Burrows, A. M., y Davila-Ross, M. (2013). OrangFACS: A Muscle-Based Facial Movement Coding System for Orangutans (*Pongo spp.*), *International Journal of Primatology*, 34(1):115–129. <https://doi.org/10.1007/S10764-012-9652-X/METRICS>
- Camerlink, I., Coulange, E., Farish, M., Baxter, E. M., y Turner, S. P. (2018). Facial expression as a potential measure of both intent and emotion, *Scientific Reports*, 8(1):17602. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35905-3>
- Carmo, L. G., Werner, L. C., Michelotto, P. V., y Daros, R. R. (2023). Horse behavior and facial movements in relation to food rewards, *PLOS ONE*, 18(6):e0286045. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286045>
- Carranza, J., Álvarez, F., Arias de Reyna, L. I. (2010). La causación del comportamiento: modelos clásicos y causas externas, *En Etología: Introducción a la ciencia del comportamiento*. Universidad de Extremadura.(3a ed.) pp. 41–61.
- Casas- Alvarado, A., Martínez Burnes, J., Mora Medina, P., Hernández Avalos, I., Miranda Cortes, A. E., Dominguez Oliva, A., y Mota Rojas, D. (2025). Facial action units as biomarkers of postoperative pain in ovariohysterectomized bitches treated with cannabidiol and meloxicam”, *Research in Veterinary Science*, In Review.

- Cohen, S., y Beths, T. (2020). Grimace Scores: Tools to Support the Identification of Pain in Mammals Used in Research, *Animals*, 10(10):1726. <https://doi.org/10.3390/ani10101726>
- Coria-Avila, G. A., Pfaus, J. G., Orihuela, A., Domínguez-Oliva, A., José-Pérez, N., Hernández, L. A., y Mota-Rojas, D. (2022). The Neurobiology of Behavior and Its Applicability for Animal Welfare: A Review, *Animals*, 12(7):928. <https://doi.org/10.3390/ani12070928>
- Correia-Caeiro, C., Guo, K., y Mills, D. (2021). Bodily emotional expressions are a primary source of information for dogs, but not for humans, *Animal Cognition*, 24(2):267–279. <https://doi.org/10.1007/S10071-021-01471-X>
- Csoltova, E., y Mehinagic, E. (2020a). Where Do We Stand in the Domestic Dog (*Canis familiaris*) Positive-Emotion Assessment: A State-of-the-Art Review and Future Directions, *Frontiers in Psychology* 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02131>
- Dalla Costa, E., Bracci, D., Dai, F., Lebelt, D., y Minero, M. (2017). Do Different Emotional States Affect the Horse Grimace Scale Score? A Pilot Study, *Journal of Equine Veterinary Science*, 54:114–117. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2017.03.221>
- Dalla Costa, E., Minero, M., Lebelt, D., Stucke, D., Canali, E., y Leach, M. C. (2014). Development of the Horse Grimace Scale (HGS) as a Pain Assessment Tool in Horses Undergoing Routine Castration, *PLoS ONE*, 9(3):e92281. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092281>
- Darwin, C. (1872). The Expressions of the Emotions in Man and Animals, *Nature*, 36:294-295. <https://doi.org/10.1038/036294c0>
- Davies, H., Wolz, I., Leppanen, J., Fernandez-Aranda, F., Schmidt, U., y Tchanturia, K. (2016). Facial expression to emotional stimuli in non-psychotic disorders: A systematic review and meta-analysis, *Neuroscience and biobehavioral reviews*, 64:252–271. <https://doi.org/10.1016/J.NEU-BIOREV.2016.02.015>
- Dolensek, N., Gehrlach, D. A., Klein, A. S., y Gogolla, N. (2020). Facial expressions of emotion states and their neuronal correlates in mice, *Science*, 368(6486):89–94. <https://doi.org/10.1126/science.aaz9468>
- Domínguez-Oliva, A., Chávez, C., Martínez-Burnes, J., Olmos-Hernández, A., Hernández-Avalos, I., y Mota-Rojas, D. (2024). Neurobiology and Anatomy of Facial Expressions in Great Apes: Application of the AnimalFACS and Its Possible Association with the Animal's Affective State, *Animals*, 14(23):3414. <https://doi.org/10.3390/ani14233414>
- Domínguez-Oliva, A., Hernández-Avalos, I., Martínez-Burnes, J., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., y Mota-Rojas, D. (2023). The Importance of Animal Models in Biomedical Research: Current Insights and Applications, *Animals*, 13(7):1223. <https://doi.org/10.3390/ani13071223>
- Domínguez-Oliva, A., Mota-Rojas, D., Hernández-Avalos, I., Mora-Medina, P., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., Casas-Alvarado, A., y Whittaker, A. L. (2022). The neurobiology

- of pain and facial movements in rodents: Clinical applications and current research”, *Frontiers in Veterinary Science*, 9:1016720. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.1016720>
- Domínguez-Oliva, A., Olmos-Hernández, A., Hernández-Ávalos, I., Lecona-Butrón, H., Mora-Medina, P., y Mota-Rojas, D. (2023). Rat Grimace Scale as a Method to Evaluate Animal Welfare, Nociception, and Quality of the Euthanasia Method of Wistar Rats, *Animals*, 13(20):3161. <https://doi.org/10.3390/ANI13203161>
- Ellis, S. L. H. (2018). Recognising and assessing feline emotions during the consultation: History, body language and behaviour, *Journal of feline medicine and surgery*, 20(5):445–456. <https://doi.org/10.1177/1098612X18771206>
- Ellison, D. L. (2017). Physiology of Pain, *Critical Care Nursing Clinics of North America*, 29(4):397–406. <https://doi.org/10.1016/j.cnc.2017.08.001>
- Evangelista, M. C., Watanabe, R., Leung, V. S. Y., Monteiro, B. P., O’Toole, E., Pang, D. S. J., y Steagall, P. V. (2019). Facial expressions of pain in cats: the development and validation of a Feline Grimace Scale, *Scientific Reports*, 9(1):19128. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55693-8>
- Farghal, M., Pajor, E., Luna, S. P. L., Pang, D., Windeyer, M. C., y Ceballos, M. C. (2024). Development of the calf grimace scale for pain and stress assessment in castrated Angus beef calves, *Scientific Reports*, 14(1):25620. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77147-6>
- Feighelstein, M., Ricci-Bonot, C., Hasan, H., Weinberg, H., Rettig, T., Segal, M., Distelfeld, T., Shimshoni, I., Mills, D. S., y Zamansky, A. (2025). Correction: Automated recognition of emotional states of horses from facial expressions”, *PLOS ONE*, 20(2):e0319501. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319501>
- Fendt, M., y Fanselow, M. S. (1999). The neuroanatomical and neurochemical basis of conditioned fear, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 23(5):743–760. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(99\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(99)00016-0)
- Gähwiler, S., Bremhorst, A., Tóth, K., y Riemer, S. (2020). Fear expressions of dogs during New Year fireworks: a video analysis, *Scientific Reports*, 10(1):16035. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72841-7>
- Gehrlach, D. A., Dolensek, N., Klein, A. S., Roy Chowdhury, R., Matthys, A., Junghänel, M., Gaitanos, T. N., Podgornik, A., Black, T. D., Reddy Vaka, N., Conzelmann, K. K., y Gogolla, N. (2019). Aversive state processing in the posterior insular cortex, *Nature Neuroscience*, 22:1424–1437. <https://doi.org/10.1038/s41593-019-0469-1>
- Gleerup, Karina B, Forkman, B., Lindegaard, C., y Andersen, P. H. (2015). An equine pain face, *Veterinary Anaesthesia and Analgesia*, 42(1):103–114. <https://doi.org/10.1111/vaa.12212>
- Gleerup, Karina Bech, Andersen, P. H., Munksgaard, L., y Forkman, B. (2015). Pain evaluation in dairy cattle, *Applied Animal Behaviour Science*, 171:25–32. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2015.08.023>

- Gomes, N., Pause, B. M., Smeets, M. A. M., y Semin, G. R. (2023). Comparing fear and anxiety chemosignals: Do they modulate facial muscle activity and facilitate identifying facial expressions?, *Chemical Senses*, 48:1–14. <https://doi.org/10.1093/CHEMSE/BJAD016>
- Grandin, T. (2018). My Reflections on Understanding Animal Emotions for Improving the Life of Animals in Zoos, *Journal of Applied Animal Welfare Science*, 21:12–22. <https://doi.org/10.1080/10888705.2018.1513843>
- Hernández-Avalos, I., Flores-Gasca, E., Mota-Rojas, D., Casas-Alvarado, A., Miranda-Cortés, A. E., y Domínguez-Oliva, A. (2021). Neurobiology of anesthetic-surgical stress and induced behavioral changes in dogs and cats: A review, *Veterinary World*, 14(2):393–404. <https://doi.org/10.14202/vetworld.2021.393-404>
- Hintze, S., Smith, S., Patt, A., Bachmann, I., y Würbel, H. (2016). Are Eyes a Mirror of the Soul? What Eye Wrinkles Reveal about a Horse's Emotional State, *PLOS ONE*, 11(10):e0164017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0164017>
- Ho, C. Y., y Berridge, K. C. (2014). Excessive disgust caused by brain lesions or temporary inactivations: mapping hotspots of the nucleus *accumbens* and ventral pallidum, *European Journal of Neuroscience*, 40(10):3556–3572. <https://doi.org/10.1111/EJN.12720>
- Hodgson, G. M. W., Flay, K. J., Perroux, T. A., y McElligott, A. G. (2024). You lick me, I like you: understanding the function of allogrooming in ungulates, *Mammal Review*, 54(4):373–386. <https://doi.org/10.1111/mam.12351>
- Jhang, J., Lee, H., Kang, M. S., Lee, H.-S., Park, H., y Han, J.-H. (2018). Anterior cingulate cortex and its input to the basolateral amygdala control innate fear response, *Nature Communications*, 9(1):2744. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05090-y>
- Julle-Danière, É., Micheletta, J., Whitehouse, J., Joly, M., Gass, C., Burrows, A. M., y Waller, B. M. (2015). MaqFACS (Macaque Facial Action Coding System) can be used to document facial movements in Barbary macaques (*Macaca sylvanus*), *PeerJ*, 15(3):e1248. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.1248/SUPP-10>
- Kaminski, J., Waller, B., y Diogo, R. (2019). Evolution of facial muscle anatomy in dogs, *PNAS*, 29:14677–14681.
- Kaminski, Juliane, Hynds, J., Morris, P., y Waller, B. M. (2017). Human attention affects facial expressions in domestic dogs, *Scientific Reports*, 7(1):2914. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12781-x>
- Kaminski, Juliane, Waller, B. M., Diogo, R., Hartstone-Rose, A., y Burrows, A. M. (2019). Evolution of facial muscle anatomy in dogs, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(29):14677–14681. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820653116>
- Keifer, O. P., Hurt, R. C., Ressler, K. J., y Marvar, P. J. (2015). The physiology of fear: Reconceptualizing the role of the central amygdala in fear learning, *Physiology*, 30(5):389–401. <https://doi.org/10.1152/physiol.00058.2014>

- Kennedy, A., Kunwar, P. S., Li, L., Stagkourakis, S., Wagenaar, D. A., y Anderson, D. J. (2020). Stimulus-specific hypothalamic encoding of a persistent defensive state, *Nature*, 586(7831):730–734. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2728-4>
- Kentâ C. Berridge, y Mortenâ L. Kringelbach. (2015). Pleasure systems in the brain. *Neuron*, 86(3):646–664.
- Kim, J., Heo, J., Ji, D., y Kim, M.-S. (2015). Quantitative assessment of pupillary light reflex in normal and anesthetized dogs: a preliminary study, *Journal of Veterinary Medical Science*, 77(4):475–478. <https://doi.org/10.1292/jvms.14-0387>
- Kleszcz, A., Cholewińska, P., Front, G., Pacoń, J., Bodkowski, R., Janczak, M., y Dorobisz, T. (2022). Review on Selected Aggression Causes and the Role of Neurocognitive Science in the Diagnosis, *Animals*, 12(3):281. <https://doi.org/10.3390/ani12030281>
- Krause, F. C., Linardatos, E., Fresco, D. M., y Moore, M. T. (2021). Facial emotion recognition in major depressive disorder: A meta-analytic review, *Journal of Affective Disorders*, 293:320–328. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2021.06.053>
- Kremer, L., Klein Holkenborg, S. E. J., Reimert, I., Bolhuis, J. E., y Webb, L. E. (2020). The nuts and bolts of animal emotion, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 113:273–286. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.01.028>
- Lambert, H., y Carder, G. (2019). Positive and negative emotions in dairy cows: Can ear postures be used as a measure?, *Behavioural Processes*, 158:172–180. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2018.12.007>
- Lamont, L. A., Tranquilli, W. J., y Grimm, K. A. (2000). Physiology of Pain, *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 30(4):703–728. [https://doi.org/10.1016/S0195-5616\(08\)70003-2](https://doi.org/10.1016/S0195-5616(08)70003-2)
- Lansade, L., Lemarchand, J., Reigner, F., Arnould, C., y Bertin, A. (2022). Automatic brushes induce positive emotions and foster positive social interactions in group-housed horses, *Applied Animal Behaviour Science*, 246:105538. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2021.105538>
- Lansade, L., Nowak, R., Lainé, A.-L., Leterrier, C., Bonneau, C., Parias, C., y Bertin, A. (2018). Facial expression and oxytocin as possible markers of positive emotions in horses, *Scientific Reports*, 8(1):4680. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32993-z>
- Leach, M. C., Klaus, K., Miller, A. L., Scotto di Perrotolo, M., Sotocinal, S. G., y Flecknell, P. A. (2012). The Assessment of Post-Vasectomy Pain in Mice Using Behaviour and the Mouse Grimace Scale, *PLOS ONE*, 7(4):e35656. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035656>
- Levine, E. D. (2008). Feline Fear and Anxiety, *Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice*, 38(5):1065–1079. <https://doi.org/10.1016/j.cvsm.2008.04.010>
- Lezama-García, K., Orihuela, A., Olmos-Hernández, A., Reyes-Long, S., y Mota-Rojas, D. (2019). Facial expressions and emotions in domestic animals, *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture*,

- Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 14:1-12. <https://doi.org/10.1079/PAVS-NNR201914028>
- Lezama-García, Karina, Mariti, C., Mota-Rojas, D., Martínez-Burnes, J., Barrios-García, H., y Gazzano, A. (2019). Maternal behaviour in domestic dogs, *International Journal of Veterinary Science and Medicine*, 7(1):20–30. <https://doi.org/10.1080/23144599.2019.1641899>
- Liu, Y., Rodenkirch, C., Moskowitz, N., Schriver, B., y Wang, Q. (2017). Dynamic Lateralization of Pupil Dilation Evoked by Locus Coeruleus Activation Results from Sympathetic, Not Parasympathetic, Contributions, *Cell Reports*, 20(13):3099–3112. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2017.08.094>
- Lundblad, J., Rashid, M., Rhodin, M., y Haubro Andersen, P. (2021). Effect of transportation and social isolation on facial expressions of healthy horses, *PLOS ONE*, 16(6):e0241532. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0241532>
- Machado, M., Silveira, R. M. F., Bittar, C. M. M., Lobos, C. M. V., y Silva, I. J. O. da. (2023). Can the emotional state of calves be noticed by their facial expression and heart rate?, *Applied Animal Behaviour Science*, 260:105874. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105874>
- Malezieux, M., Klein, A. S., y Gogolla, N. (2023). Neural Circuits for Emotion, *Annual Review of Neuroscience*, 46:211–231. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-111020-103314>
- Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, Physiology, and Function, *Journal of Cognition*, 1(1):16. <https://doi.org/10.5334/joc.18>
- McLennan, K., y Mahmoud, M. (2019). Development of an Automated Pain Facial Expression Detection System for Sheep (*Ovis Aries*), *Animals*, 9(4):196. <https://doi.org/10.3390/ani9040196>
- Mogil, J. S. (2022). The history of pain measurement in humans and animals, *Frontiers in Pain Research*, 3:1031058. <https://doi.org/10.3389/fpain.2022.1031058>
- Mogil, J. S., Pang, D. S. J., Silva Dutra, G. G., y Chambers, C. T. (2020). The development and use of facial grimace scales for pain measurement in animals, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 116:480–493. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.07.013>
- Montag, C., y Panksepp, J. (2017). Primary Emotional Systems and Personality: An Evolutionary Perspective, *Frontiers in Psychology*, 8:464. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00464>
- Monteiro, B. P., Lascelles, B. D. X., Murrell, J., Robertson, S., Steagall, P. V. M., y Wright, B. (2022). 2022 WSAVA guidelines for the recognition, assessment and treatment of pain, *Journal of Small Animal Practice*. <https://doi.org/10.1111/jsap.13566>
- Morecraft, R. J., Louie, J. L., Herrick, J. L., y Stilwell-Morecraft, K. S. (2001). Cortical innervation of the facial nucleus in the non-human primate: a new interpretation of the effects of stroke and related subtotal brain trauma on the muscles of facial expression, *Brain : a journal of neurology*, 124(1):176–208. <https://doi.org/10.1093/BRAIN/124.1.176>

- Morecraft, R. J., Stilwell-Morecraft, K. S., y Rossing, W. R. (2004). The motor cortex and facial expression: new insights from neuroscience, *The neurologist*, 10(5):235–249. <https://doi.org/10.1097/01.NRL.0000138734.45742.8D>
- Mota-Rojas, D., Lezama-García, K., Domínguez-Oliva, A., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., Casas-Alvarado, A., Torres-Bernal, F., y Martínez-Burnes, J. (2023). Neurobiology of emotions in animal relationships: Facial expressions and their biological functions in mammals, *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 11:2023ss01. <https://doi.org/10.31893/jabb.23ss01>
- Mota-Rojas, D., Marcet-Rius, M., Ogi, A., Hernández-Ávalos, I., Mariti, C., Martínez-Burnes, J., Mora-Medina, P., Casas, A., Domínguez, A., Reyes, B., y Gazzano, A. (2021). Current Advances in Assessment of Dog's Emotions, Facial Expressions, and Their Use for Clinical Recognition of Pain, *Animals*, 11(11):3334. <https://doi.org/10.3390/ani11113334>
- Mota-Rojas, D., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., Hernández, E., Martínez-Burnes, J., y Whittaker, A. L. (2020). The Utility of Grimace Scales for Practical Pain Assessment in Laboratory Animals, *Animals*, 10(10):1838. <https://doi.org/10.3390/ani10101838>
- Mota-Rojas, D., Orihuela, A., Martínez-Burnes, J., Gómez, J., Mora-Medina, P., Alavez, B., Ramírez, L., y González-Lozano, M. (2020). Neurological modulation of facial expressions in pigs and implications for production, *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 8(4):232–243. <https://doi.org/10.31893/jabb.20031>
- Mota-Rojas, D., Whittaker, A. L., Bienboire-Frosini, C., Buenhombre, J., Mora-Medina, P., Domínguez-Oliva, A., Martínez-Burnes, J., Hernández-Avalos, I., Olmos-Hernández, A., Verduzco-Mendoza, A., Casas-Alvarado, A., Lezama-García, K., y Grandin, T. (2025). The neurobiological basis of emotions and their connection to facial expressions in non-human mammals: insights in nonverbal communication, *Frontiers in Veterinary Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1541615>
- Mota-Rojas, D., Whittaker, A. L., Domínguez-Oliva, A., Strappini, A. C., Álvarez-Macías, A., Mora-Medina, P., Ghezzi, M., Lendez, P., Lezama-García, K., y Grandin, T. (2024). Tactile, Auditory, and Visual Stimulation as Sensory Enrichment for Dairy Cattle, *Animals*, 14(9):1265. <https://doi.org/10.3390/ani14091265>
- Mota-Rojas, D., Whittaker, A. L., Strappini, A. C., Orihuela, A., Domínguez-Oliva, A., Mora-Medina, P., Álvarez-Macías, A., Hernández-Avalos, I., Olmos-Hernández, A., Reyes-Sotelo, B., y Grandin, T. (2024). Human animal relationships in Bos indicus cattle breeds addressed from a Five Domains welfare framework, *Frontiers in Veterinary Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fvets.2024.1456120>

- Nagasawa, M., Kawai, E., Mogi, K., y Kikusui, T. (2013). Dogs show left facial lateralization upon reunion with their owners, *Behavioural Processes*, 98:112–116. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2013.05.012>
- Neethirajan, S., Reimert, I., y Kemp, B. (2021). Measuring Farm Animal Emotions—Sensor-Based Approaches. *Sensors*, 21(2):553. <https://doi.org/10.3390/S21020553>
- Nicholson, S. L., y O'Carroll, R. Á. (2021). Development of an ethogram/guide for identifying feline emotions: a new approach to feline interactions and welfare assessment in practice, *Irish veterinary journal*, 74(1):8. <https://doi.org/10.1186/s13620-021-00189-z>
- Ortiz, S., Latsko, M. S., Fouty, J. L., Dutta, S., Adkins, J. M., y Jasnow, A. M. (2019). Anterior Cingulate Cortex and Ventral Hippocampal Inputs to the Basolateral Amygdala Selectively Control Generalized Fear, *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 39(33):6526–6539. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0810-19.2019>
- Panksepp, J. (1982). Toward a general psychobiological theory of emotions. *Behavioral and Brain Sciences*, 5(3):407–422. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00012759>
- Paul, E. S., y Mendl, M. T. (2018). Animal emotion: Descriptive and prescriptive definitions and their implications for a comparative perspective. *Applied Animal Behaviour Science*, 205:202–209. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2018.01.008>
- Phelps, E. A., y LeDoux, J. E. (2005). Contributions of the Amygdala to Emotion Processing: From Animal Models to Human Behavior. *Neuron*, 48(2):175–187. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.09.025>
- Proctor, H. S., y Carder, G. (2015). Measuring positive emotions in cows: Do visible eye whites tell us anything?, *Physiology & Behavior*, 147:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.04.011>
- Purves, D., Augustine, G., & Fitzpatrick, D. (2001). Neuroscience. En *Sunderland* (2a ed.).
- Raja, S. N., Carr, D. B., Cohen, M., Finnerup, N. B., Flor, H., Gibson, S., Keefe, F. J., Mogil, J. S., Ringkamp, M., Sluka, K. A., Song, X.-J., Stevens, B., Sullivan, M. D., Tutelman, P. R., Us-hida, T., y Vader, K. (2020). The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises, *Pain*, 161(9):1976–1982. <https://doi.org/10.1097/j.pain.0000000000001939>
- Rashid, M., Silventoinen, A., Glerup, K. B., y Andersen, P. H. (2020). Equine Facial Action Coding System for determination of pain-related facial responses in videos of horses, *PLOS ONE*, 15(11):e0231608. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231608>
- Reid, J., Scott, E. M., Calvo, G., y Nolan, A. M. (2017). Definitive Glasgow acute pain scale for cats: validation and intervention level, *Veterinary Record*, 180(18):449–449. <https://doi.org/10.1136/vr.104208>
- Ricci-Bonot, C., y Mills, D. S. (2023). Recognising the facial expression of frustration in the horse during feeding period, *Applied Animal Behaviour Science*, 265:105966. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2023.105966>

- Rollins, M., Feiner, J. R., Lee, J. M., Shah, S., y Larson, M. (2014). Infrared Pupillometry, *Anesthesiology*, 121(5):1037–1044.
- Root, J. C., Wong, P. S., y Kinsbourne, M. (2006). Left hemisphere specialization for response to positive emotional expressions: A divided output methodology, *Emotion*, 6(3):473–483. <https://doi.org/10.1037/1528-3542.6.3.473>
- Schirmer, A., y McGlone, F. (2022). Editorial overview: Affective touch: neurobiology and function”, *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 45:101129. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2022.101129>
- Scott, L., y Florkiewicz, B. N. (2023). Feline faces: Unraveling the social function of domestic cat facial signals, *Behavioural Processes*, 213:104959. <https://doi.org/10.1016/j.beproc.2023.104959>
- Severson, K. S., Xu, D., Yang, H., y O'Connor, D. H. (2019). Coding of whisker motion across the mouse face, *eLife*, 8:e41535. <https://doi.org/10.7554/eLife.41535>
- Siniscalchi, M., D'Ingeo, S., Minunno, M., y Quaranta, A. (2018). Communication in Dogs, *Animals*, 8(8), 131. <https://doi.org/10.3390/ani8080131>
- Spunt, R. P., Ellsworth, E., y Adolphs, R. (2017). The neural basis of understanding the expression of the emotions in man and animals, *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 12(1):95–105. <https://doi.org/10.1093/scan/nsw161>
- Travain, T., y Valsecchi, P. (2021). Infrared Thermography in the Study of Animals' Emotional Responses: A Critical Review, *Animals*, 11(9):2510. <https://doi.org/10.3390/ani11092510>
- Trösch, M., Cuzol, F., Parias, C., Calandreau, L., Nowak, R., y Lansade, L. (2019). Horses Categorize Human Emotions Cross-Modally Based on Facial Expression and Non-Verbal Vocalizations, *Animals*, 9(11):862. <https://doi.org/10.3390/ani9110862>
- Tsai, T. C., Wu, C. H., Wen, C. Y., y Shieh, J. Y. (1993). Studies of the motoneurons following the injection of horseradish peroxidase into the peripheral branches of the facial nerve in rats, *Acta anatomica*, 148(1):42–48. <https://doi.org/10.1159/000147521>
- Waller, B., Caeiro, C., Peirce, K., Burrows, A., y Kaminski, J. (2013). The Dog Facial Action Coding System Manual.
- Waller, B.M., Julle-Daniere, E., y Micheletta, J. (2020). Measuring the evolution of facial 'expression' using multi-species FACS, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 113:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.02.031>
- Waller, Bridget M., y Micheletta, J. (2013). Facial Expression in Nonhuman Animals, 5(1):54–59. <https://doi.org/10.1177/1754073912451503>
- Wathan, J., Proops, L., Grounds, K., y McComb, K. (2016). Horses discriminate between facial expressions of conspecifics, *Scientific Reports*, 6(1):38322. <https://doi.org/10.1038/srep38322>
- Wathan, Jen, Burrows, A. A. M., Waller, B. B. M., y McComb, K. (2015a). Correction: EquiFACS: The Equine Facial Action Coding System, *PLOS ONE*, 10(9):e0137818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137818>

- Wathan, Jen, Burrows, A. M., Waller, B. M., y McComb, K. (2015b). "EquiFACS: The Equine Facial Action Coding System", *PLOS ONE*, 10(8):e0131738. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131738>
- Wathan, Jennifer, y McComb, K. (2014). The eyes and ears are visual indicators of attention in domestic horses. *Current Biology*, 24(15):PR677-R679. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.06.023>
- Zablocki-Thomas, P. B., Rogers, F. D., y Bales, K. L. (2022). Neuroimaging of human and non-human animal emotion and affect in the context of social relationships. *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnbeh.2022.994504>
- Zimmermann, B., Castro, A. N. C., Lendez, P. A., Carrica Illia, M., Carrica Illia, M. P., Teyseyre, A. R., Toloza, J. M., Ghezzi, M. D., y Mota-Rojas, D. (2024). Anatomical and functional basis of facial expressions and their relationship with emotions in horses, *Research in Veterinary Science*, 180:105418. <https://doi.org/10.1016/J.RVSC.2024.105418>
- Zych, A. D., y Gogolla, N. (2021). Expressions of emotions across species, *Current Opinion in Neurobiology*, 68:57–66. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2021.01.003>

Calidad gamética y reproducción asistida en *Oncorhynchus mykiss*: líneas fenotípicas en el Centro Acuícola "El Zarco", Estado de México

Nayeli Berenice Aguirre Valenzuela¹, Jesús Damaso Bustamante González²,
Abigail Mendoza Mondragón¹, Araceli Cortés García³

Resumen. El estudio evaluó la calidad gamética de *Oncorhynchus mykiss* (trucha arcoíris) de líneas fenotípicas en el centro acuícola "El Zarco" durante diciembre-febrero. Se analizaron parámetros biométricos, físico-químicos y de calidad espermática en líneas Amanalco, Poblano, HN y Pool, y características de ovocitos en Z18 y HN. Los datos fueron procesados por ($\bar{x} \pm DE$), ANOVA de una vía y prueba de Tukey ($p < 0.05$). Amanalco destacó en calidad seminal con movilidad flagelar de 99 s y viabilidad celular del 99.29%; mientras que, Pool presentó mayor volumen seminal (11.67 mL). En hembras, Z18 mostró un peso promedio de 3.15 kg y desove de 4,124 ovocitos, mientras que HN tuvo ovocitos grandes (2.61 mm). El color de ovocitos fue naranja en Z18. Las combinaciones reproductivas entre machos Amanalco y hembras Z18/HN alcanzaron un 90% de fertilización y 95% de eclosión. Los resultados evidencian que combinaciones específicas entre líneas mejoran la eficiencia reproductiva y permiten una acuicultura sostenible en los centros de producción.

Palabras clave: Reproducción, Semen, Óvulo, Viabilidad.

¹ Alumna de la Maestría en Ciencias Agropecuarias, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, CDMX. correo electrónico: nayeliaguirre66@gmail.com

² Posdoctorante SECIHTI, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, CDMX.

³ Laboratorio de Reproducción Genética y Sanidad Acuícola, Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, CDMX. Correo electrónico: acortes@correo.xoc.uam.mx.

Abstract. *The study evaluated the gametic quality of *Oncorhynchus mykiss* (rainbow trout) of phenotypic lines at the “El Zarco” aquaculture center during December-February. Biometric, physicochemical and sperm quality parameters were analyzed in Amanalco, Poblano, HN and Pool lines, and oocyte characteristics in Z18 and HN. Data were processed by ($\bar{x} \pm SD$), one-way ANOVA and Tukey’s test ($p < 0.05$). Amanalco stood out in seminal quality with flagellar motility of 99 s and cell viability of 99.29%; while, Pool presented higher seminal volume (11.67 mL). In females, Z18 showed an average weight of 3.15 kg and spawned 4,124 oocytes, while HN had large oocytes (2.61 mm). Oocyte color was orange in Z18. Reproductive combinations between Amanalco males and Z18/HN females achieved 90% fertilization and 95% hatching. The results show that specific combinations between lines improve reproductive efficiency and allow for sustainable aquaculture in production centers.*

Keywords: *Reproduction, Semen, Oocyte, Viability.*

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de alimentos en los últimos años ha impulsado la reproducción intensiva en cautiverio de diversas especies de peces. En México, una de las especies acuícolas de mayor consumo es la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*), cuya producción alcanza las 872 toneladas, ubicándola en la trigésima primera posición a nivel nacional en términos de valor económico (SAGARPA, 2023). En este contexto, el Estado de México se destaca como principal productor, siendo el centro acuícola “El Zarco” (dependiente de la Comisión Nacional de Pesca), una instalación clave de producción y distribución de huevo oculado y pie de cría para los piscicultores del área, así como distintos estados: Guerrero, Querétaro, Puebla, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Chihuahua y Oaxaca (SADER, 2018).

La producción comercial sostenible de *O. mykiss* depende del suministro continuo de ovas embrionadas y/o alevines de alta calidad, lo cual requiere mantener un plantel de reproductores con una elevada fertilidad. Sin embargo, uno de los obstáculos para la trucha arcoíris, es que presenta un patrón reproductivo estacional, con un periodo de reproducción entre agosto y febrero. Lo que obliga a los centros de cultivo a maximizar el uso de los recursos reproductivos disponibles tanto en el pico como fuera del periodo reproductivo (Castro-Castellón *et al.*, 2017). Aunado a esto, en los sistemas de cultivo intensivo, donde los organismos son mantenidos en condiciones de confinamiento y sometidos a una elevada presión de explotación, es común encontrar alteraciones gonadales que afectan negativamente su desempeño reproductivo entre las que destacan la presencia de atresia folicular y una maduración sexual desincronizada. Como consecuencia, se hace indispensable la aplicación de métodos artificiales para inducir y sincronizar los procesos reproductivos (Corriero *et al.* 2021; Bastardo *et al.*, 2004).

Evaluar la calidad de los gametos se vuelve entonces un factor clave en los programas de reproducción, ya que permite identificar y seleccionar a los mejores reproductores, incrementando la eficiencia en la producción de alevines viables. La calidad espermática se relaciona directamente con el potencial de fertilización, mientras que la calidad del ovocito influye en el desarrollo embrionario y la supervivencia larval (Bobe y Labbé, 2010; Peña, 2015). Esta evaluación se vuelve relevante considerando que diversos factores como la edad, genética, alimentación, fotoperiodo, temperatura, temporada reproductiva y el estrés por manipulación pueden afectar significativamente la calidad de los gametos (Bustamante-González *et al.*, 2018).

Comprender estos procesos es fundamental para el éxito de los programas de reproducción asistida y para garantizar la sostenibilidad de los sistemas acuícolas. Conocer la calidad de los gametos es clave para una reproducción eficaz y controlada (Kowalski y Cejko, 2019). Por lo tanto, el objetivo de la investigación fue caracterizar los gametos masculinos y femeninos de las diferentes líneas de trucha arcoíris del centro acuícola “El Zarco”, así como evaluar el porcentaje de fertilización y eclosión como indicador del éxito reproductivo. Esto con el propósito de optimizar los procesos de reproducción mediante la selección de líneas fenotípicas que no sólo exhiban un alto rendimiento reproductivo, sino que también permitan maximizar los beneficios productivos y reducir los costos operativos, garantizando así la disponibilidad de alevines de alta calidad que contribuyan al fortalecimiento y sostenibilidad de la producción acuícola nacional.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA, MÉTODOS Y TÉCNICAS

Área de estudio

El estudio se desarrolló a finales de otoño e inicio de invierno (diciembre-febrero), en el Centro Tru-tícola “El Zarco”, localizado en el municipio de Ocoyoacac, Estado de México a 19° 17' latitud Norte y 99° 22' longitud Oeste, con altitud de 3.400 m.s.n.m y clima templado subhúmedo (C(w2) (w) ci) (Pérez-Miranda *et al.*, 2013; Vega-Ramírez *et al.*, 2013).

Parámetros fisicoquímicos

Se registró la temperatura ambiente y del agua (°C) con un termómetro de mercurio, pH con un potenciómetro digital marca Hanna, modelo HI9125 y la transparencia-profundidad con disco de Secchi.

Selección de reproductores

Se seleccionaron de manera azarosa cinco machos de las líneas fenotípicas: Amanalco, Poblana, HN y Pool y cinco hembras de las líneas: HN y Z18.

Biometría de reproductores (peso y talla)

Los peces fueron sedados con esencia de clavo a una concentración de $30 \mu\text{L L}^{-1}$ de agua, con el objetivo de facilitar su manipulación durante el registro de parámetros morfométricos y la extracción de gametos. En el caso de los machos, las variables evaluadas incluyeron longitud total (LT), longitud patrón (LP), longitud cefálica (LC), grosor y altura (cm), utilizando un ictiómetro convencional y una escuadra de 90° . El peso (g), tanto de hembras como de machos, se determinó con una balanza digital marca OHAUS, modelo Ranger 3000, con una capacidad máxima de 10 kg y una precisión de ± 0.1 kg.

Espermograma

El semen se obtuvo de manera individual y por línea fenotípica, previamente a la extracción la abertura genital se limpió con papel absorbente y mediante una ligera presión sobre la región abdominal en dirección antero-caudal se obtuvo el semen (Bustamante-González *et al.*, 2018). La recolección se realizó en tubos graduados de 50 mL para estimar directamente el volumen (mL).

Se evaluó la consistencia (lechosa o acuosa) y el color (blanco o amarillo) de las muestras de semen. La concentración espermática se determinó a partir de una solución stock compuesta por 950 μL de NaCl al 0,9%, 500 μL de formol al 4% y 50 μL de semen fresco, previamente homogeneizado (Bustamante-González *et al.*, 2018). El recuento de espermatozoides (células por μL^{-1}) se estimó mediante cámara Neubauer y microscopio óptico a 40X. El pH se obtuvo con un potenciómetro Hanna HI 9125[®] y electrodo HI 1330. La movilidad espermática se evaluó de manera individual y por línea fenotípica, 1 μL de semen fresco se activó con 5 μL de agua e inmediatamente se observó bajo microscopio Olympus Optical a 40X. Una sola persona realizó la evaluación con la finalidad de mantener estandarizado el sesgo en las determinaciones. La movilidad se estimó subjetivamente con valores de 0 a 100% (Bustamante-González *et al.*, 2018). El porcentaje de espermatozoides vivos se llevó a cabo mediante una tinción y frotis, 1 μL de semen más un 1 μL de Esperma-Vit[®], bajo el siguiente criterio: espermatozoides teñidos de color rosa fueron considerados muertos, mientras que los no teñidos fueron clasificados como vivos. Cada estimación se realizó en 100 espermatozoides.

Calidad ovocitaria

Los ovocitos se obtuvieron de manera individual por línea fenotípica mediante ligera presión abdominal en dirección antero-caudal y se recolectaron en contenedores de plástico.

La tasa de ovulación (número total de ovocitos por hembra), se determinó mediante la recolección completa del desove en un recipiente seco, previamente codificado y pesado. Para estimar el peso individual de los ovocitos, se tomó una submuestra de 5 g de cada desove, en la cual los ovocitos fueron contados manualmente.

El diámetro se determinó por el método de Von Bayer (IMARPE, 2015), consistió en colocar una fila de ovocitos junto a una regla y mediante la siguiente conversión:

$$\text{Diámetro promedio} = \frac{\text{número de ovocitos}}{10} \quad (1)$$

Los ovocitos fueron clasificados de acuerdo al color, amarillo o naranja acorde a la línea fenotípica.

Fecundación (porcentaje de fecundación y eclosión)

Se mezclaron 336 g de ovocitos (Z18/H-N) con 4.5 mL de semen de la línea Amanalco, y 311 g de ovocitos (H-N) con 4.5 mL de semen de la línea Poblano. La mezcla se homogeneizó durante 5 min, se enjuagó y dejó hidratar por 10 min. Posteriormente, se retiraron los ovocitos no fecundados y los fertilizados se trasladaron a incubadoras californianas para monitorear el desarrollo embrionario. A los 15 días se eliminaron los huevos muertos y, tras 32 días, se evaluó el porcentaje de eclosión, con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ de huevo muerto} = \frac{\text{No. total de huevos muertos} \times 100}{\text{No. total de huevos}} \quad (2)$$

$$\% \text{ de fecundación} = \% \text{ No. total de huevos} - \% \text{ de huevo muerto} \quad (3)$$

$$\% \text{ de eclosión} = \frac{(\text{No. total de huevos eclosionados} \times 100)}{(\text{No. total de huevos fecundados})} \quad (4)$$

Análisis estadístico

Las variables de estudio fueron procesadas con análisis descriptivos, expresados con media $\pm$ desviación estándar (DE). Para las variables correspondientes a los machos, se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), seguido de la prueba de Tukey para identificar diferencias significativas entre líneas. En el caso de las hembras, se utilizó la prueba t de Student ambas con un nivel de significancia de $p < 0.05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa SigmaPlot, versión 14.0 (Bustamante-González *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Biometría

En cuanto a la talla, los machos de la línea Amanalco presentaron los mayores valores de peso y longitud en comparación con las demás líneas. Sin embargo, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p > 0.05$) entre las variables analizadas (Tabla 1). En el caso de las hembras, se observaron diferencias significativas en el peso entre las líneas Z18 y H-N ($p < 0.05$) (Tabla 4).

Tabla 1. Biometría de machos de trucha arcoíris (*O. mykiss*)

Línea Fenotípica	Peso (kg)	Longitud total (cm)	Longitud patrón (cm)	Longitud cefálica (cm)	Grosor (cm)	Atura (cm)
Amanalco	1.70 $\pm$ 0.41	53.06 $\pm$ 6.19	47.80 $\pm$ 5.68	14.07 $\pm$ 2.33	7.14 $\pm$ 0.72	11.48 $\pm$ 1.18
Poblano	1.60 $\pm$ 0.23	51.74 $\pm$ 2.57	46.54 $\pm$ 2.13	14.10 $\pm$ 1.05	7.44 $\pm$ 0.37	11.70 $\pm$ 0.44
H-N	1.36 $\pm$ 0.43	50.90 $\pm$ 4.97	44.55 $\pm$ 2.96	13.82 $\pm$ 1.15	7.03 $\pm$ 0.46	10.48 $\pm$ 1.19
Pool	1.43 $\pm$ 0.26	50.67 $\pm$ 3.51	45 $\pm$ 3.00	12.33 $\pm$ 0.57	6.50 $\pm$ 0.50	11.67 $\pm$ 0.58

Valores promedio $\pm$ DE.

Espermograma

No se detectaron diferencias significativas en el volumen, pH, movilidad (%) y concentración espermática ($p < 0.05$) entre líneas fenotípicas, pero sí se detectaron diferencias entre la duración de la movilidad y el porcentaje de espermatozoides vivos ($p < 0.05$) (Tabla 2). Sin embargo, para fines reproductivos el porcentaje y duración de la movilidad juega un papel importante, siendo la línea fenotípica “Amanalco” quien presentó los mejores resultados (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización espermática de trucha arcoíris (*O. mykiss*)

Línea fenotípica	Volumen (mL)	pH	Movilidad (%)	Movilidad (s)	% Vivos	Concentración espermática ($\times 10^9$)
Amanalco	9.96 ± 4.03	8.06 ± 0.29	98.25 ± 2.90	99 ± 10.66 a	99.29 ± 1.89 a	1.33 ± 0.68
Poblanos	7.36 ± 4.37	8.25 ± 0.22	98.33 ± 2.58	79.10 ± 10.41 b	99.17 ± 2.04 a	1.41 ± 0.64
H-N	8.42 ± 4.25	8.12 ± 0.26	97.50 ± 2.74	81.70 ± 10.26 b	98.33 ± 2.58 a	0.93 ± 0.26
Pool	11.67 ± 3.82	7.07 ± 0.12	98.33 ± 2.89	92.50 ± 16.07 ab	95.83 ± 1.44 b	1.24 ± 0.21

Valores promedio $\pm$ DE. Los superíndices diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Color y consistencia del semen

De acuerdo con el análisis realizado, predominó una consistencia lechosa del 100% en línea pool y 85.7% en poblanos y para todas las líneas el color fue 100% blanco.

Tasa de ovulación

En relación con los criterios evaluados para los ovocitos, la línea Z-18 presentó un peso corporal promedio mayor (3.153 ± 0.33 kg), lo cual se reflejó también en la tasa de ovulación (dato) (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización de ovocitos de trucha arcoíris (*O. mykiss*)

Línea Fenotípica	Peso (kg)	Tasa de ovulación	Tamaño del huevo (mm)	Color	
				Amarillo %	Naranja %
Z 18	3.153 ± 0.33 a	4885.5 ± 205.5 a	2.41 ± 0.25	40	60
H-N	0.829 ± 0.93 b	1318 ± 67.82 b	2.61 ± 0.33	33.33	66.67

Valores promedio ± DE. Los superíndices diferentes indican diferencias significativas ($p < 0.05$).

Respecto al tamaño de los ovocitos, el valor promedio más alto correspondió a la línea H-N, con 2.61 ± 0.33 (Tabla 4).

El color ovocitario, en la línea Z-18 predominó el color naranja en el 60% de los ejemplares evaluados, mientras que en la línea H-N fue más frecuente el color amarillo, presente en el 66.67% de los casos (Tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia reproductiva de gametos de trucha arcoíris (*O. mykiss*)

Línea Fenotípica ♂	Línea Fenotípica ♀	Desove		Semen (mL)	Solución activadora (mL)	Fertilización (%)	Eclosión (%)
		Peso (g)	No. de ovocitos				
Z 18/H-N	Amanalco	336	6,479	4.5	40	90	95
H-N	Poblano	311	5,236	4.5	40	88	85

Valores promedio y $\pm$. La eficiencia reproductiva se representó con el porcentaje de fertilización y el porcentaje de eclosión. Se utilizó agua del centro acuícola como solución activadora.

Fecundación

Porcentaje de fecundación

Los resultados muestran que el grupo con machos Amanalco y hembras Z18/H-N obtuvo el mayor porcentaje de fertilización alcanzando un 90% de ovocitos fecundados

Porcentaje de eclosión

Se evaluó el porcentaje de eclosión de los ovocitos previamente fertilizados, obteniendo el mejor resultado en las líneas Amanalco (machos) y Z18/H-N (hembras) con el 95 % de eclosión (Tabla 5).

DISCUSIÓN

Para la acuicultura evaluar la calidad y cantidad del semen en los centros de cultivo a lo largo de la temporada reproductiva permite estimar el potencial reproductivo de la población (Sahin *et al.*, 2014; Bustamante-González *et al.*, 2016). Los resultados presentes en esta investigación determinaron la calidad seminal (volumen, concentración, movilidad y % de células vivas), al final de la temporada reproductiva encontrando diferencias ($p < 0.05$) en cuanto a las líneas fenotípicas de *O. mykiss* que se evaluaron.

En el presente estudio, se observaron variaciones en el volumen seminal entre las diferentes líneas fenotípicas de *Oncorhynchus mykiss*, destacando la línea Pool con el valor más alto (11.67 ± 3.82 mL), seguida por Amanalco, H-N y Poblano. Estos resultados, obtenidos durante los meses de diciembre a febrero, muestran un promedio menor (8.78 ± 6.19 mL) en comparación con el reportado por Bustamante-González *et al.* (2018) para el periodo reproductivo completo (17.26 ± 13.15 mL), lo que sugiere una reducción estacional del volumen espermático a medida que avanza la temporada (Suquet *et al.*, 1994). Sin embargo, los valores registrados en las líneas Pool y Amanalco superaron el promedio estacional, lo que podría reflejar un mayor desarrollo gonadal o condiciones ambientales especialmente favorables durante la recolección.

Aunque en el presente estudio no existe diferencias estadísticas entre las líneas evaluadas en cuanto al volumen seminal, los valores se encuentran dentro del rango considerado funcionalmente adecuado para llevar a cabo fertilizaciones exitosas. Este resultado es coherente con lo reportado por estudios previos en trucha arcoíris (*O. mykiss*), donde volúmenes seminales bajos ($100\text{--}150$ μL) han sido efectivos para fertilizar un alto número de ovocitos, siempre que se mantengan concentraciones espermáticas adecuadas ($\geq 10^9$ espermatozoides/mL) y altos niveles de movilidad (Castro-Castellón *et al.*, 2017; Cabrita *et al.*, 2014).

En este contexto, los volúmenes registrados en este estudio pueden considerarse adecuados para lograr tasas de fecundación superiores al 90%, especialmente cuando se ajusta la proporción de espermatozoides: ovocito en los protocolos de fertilización. Esto se alinea con los hallazgos de Moccia y Munkittrick (1987), quienes reportaron que, aunque los volúmenes seminales de baja cantidad pueden ser funcionales, la clave para una fecundación exitosa radica en la calidad del semen, especialmente en concentración y movilidad del espermatozoide. Por lo tanto, aunque no se observaron diferencias significativas en los volúmenes entre líneas, los valores alcanzados se ajustan a las necesidades fisiológicas de la especie.

Aunque un volumen seminal elevado podría reflejar una mayor actividad secretora de las glándulas accesorias y de los testículos; esto no implica necesariamente una mayor concentración de espermatozoides por mL como señalan Billard *et al.* (1995), un volumen alto con baja concentración puede diluir el contenido espermático efectivo, comprometiendo la capacidad fecundante del eyaculado. Por ello, es fundamental considerar tanto el volumen como la concentración espermática para mejorar los procesos productivos, priorizando un equilibrio entre ambos parámetros.

La concentración espermática presentó diferencias entre las líneas evaluadas. La línea Poblano registró la mayor concentración ($1.41 \pm 0.64 \times 10^9$ espermatozoides/mL), seguida de Amanalco ($1.33 \pm 0.68 \times 10^9$), Pool ($1.24 \pm 0.21 \times 10^9$) y H-N ($0.93 \pm 0.26 \times 10^9$). Aunque estas concentraciones son inferiores a las reportadas por Bustamante-González *et al.* (2018), quienes observaron una media general de $5.89 \pm 3.19 \times 10^9$ espermatozoides/mL durante la temporada reproductiva de *O. mykiss*, y específicamente $3.37 \pm 1.66 \times 10^9$ espermatozoides/mL hacia el final del mismo periodo (etapa que coincide con la de este estudio), los valores obtenidos se encuentran dentro del rango considerado funcionalmente adecuado para asegurar una alta capacidad fecundante en salmónidos.

Algunos estudios han reportado disminución progresiva en la concentración espermática conforme avanza la temporada reproductiva. En trucha arcoíris (*O. mykiss*), Büyükhatoğlu y Holtz (1984) observaron una reducción marcada en las concentraciones hacia el final del ciclo reproductivo, fenómeno que también fue descrito en la tenca (*Tinca tinca*) por Zuromska (1981). Esta disminución ha sido atribuida al agotamiento fisiológico del tracto reproductor, así como a cambios hormonales que comprometen la espermatogénesis durante las etapas finales del periodo de espermiación.

Desde el punto de vista reproductivo, se ha establecido que una concentración mínima de 1×10^9 espermatozoides/mL es adecuada para lograr tasas de fertilización superiores al 90%, siempre que se mantenga una proporción mínima de 10^5 espermatozoides por ovocito (Cabrita *et al.*, 2014). En condiciones óptimas, 1 mL de semen con concentraciones entre 9 y 26×10^9 espermatozoides/mL puede fertilizar entre 2,000 y 3,000 ovocitos, dependiendo de la movilidad y viabilidad de los espermatozoides (Castro-Castellón *et al.*, 2017).

En el presente estudio, la mayoría de las líneas evaluadas superaron este umbral mínimo, lo que indica un potencial fecundante adecuado. No obstante, la línea H-N presentó una concentración espermática baja, lo que sugiere la necesidad de ajustar el volumen de semen empleado por lote de ovocitos para garantizar niveles de fertilización comparables a los observados en las otras líneas. Estos hallazgos destacan elementos de adaptar las estrategias de manejo reproductivo a las características particulares de cada línea genética, especialmente en sistemas orientados a la producción eficiente y sostenible.

A pesar de las diferencias entre líneas, la consistencia del eyaculado respaldó su funcionalidad, ya que la mayoría de las muestras presentó una consistencia blanco-lechosa homogénea, característica típica del semen de salmónidos en condiciones reproductivas. Esta apariencia se asocia con alta concentración espermática y buena integridad celular. Según Navarro *et al.* (2004), una consistencia cremosa

y opaca indica mayor cantidad de espermatozoides, mientras que una textura acuosa o traslúcida refleja menor concentración o un aumento del plasma seminal.

Por lo tanto, la homogeneidad en la apariencia del semen entre líneas, junto con los valores de concentración observados, sugiere que los parámetros bioquímicos y funcionales del espermatozoide se mantienen dentro de rangos óptimos para la fecundación. Este hallazgo apoya la viabilidad del semen recolectado en todas las líneas evaluadas, incluso en casos donde los parámetros cuantitativos no alcanzan los valores máximos reportados en la literatura como los mencionados por Bustamante *et al.* (2018).

En cuanto a la movilidad espermática fue en promedios superiores al 97% en todas las líneas fenotípicas, con lo que refleja una alta calidad seminal bajo las condiciones experimentales. Las líneas Amanalco, Poblano y Pool alcanzaron valores cercanos al 98%, mientras que HN presentó 97.5%, cifras que coinciden con lo reportado por Lahnsteiner *et al.* (1998), quienes señalan que, en condiciones óptimas, la movilidad en trucha arcoíris suele superar el 90%.

La movilidad del espermatozoide es esencial para el éxito de la fertilización, puede verse influenciado por factores ambientales como el pH del medio activador. Una disminución por debajo de 7.5 puede reducir la movilidad a menos del 50% (Dziewulska y Domagała, 2013). En peces teleósteos, la activación espermática ocurre al contacto con un medio acuoso, donde variables fisicoquímicas como presión osmótica, temperatura y pH desencadenan procesos fisiológicos que regulan el batido flagelar. En *O. mykiss*, el rango óptimo de pH para una movilidad eficiente está entre 8.0 y 8.2; valores menores a 7.6 disminuyen significativamente la duración del movimiento espermático, evidenciando la importancia del equilibrio iónico en el mantenimiento de la propulsión celular (Cosson, 2010; Alavi y Cosson, 2006; Bustamante-González *et al.*, 2018).

En salmónidos, la movilidad se caracteriza por ser breve y altamente transitoria, con una duración que raramente supera los 60 s, debido a la despolarización rápida de la membrana plasmática y a la limitada disponibilidad de reservas energéticas (López-Hernández *et al.*, 2018). Se ha estimado que el tiempo óptimo para que ocurra la singamia es de aproximadamente 40 s (Dzyuba y Cosson, 2014); Sin embargo, en el presente estudio se observaron tiempos de movilidad superiores a los 79 s en todas las líneas evaluadas. Este resultado contrasta con lo reportado por Benau y Terner (1980) y Munkittrick y Moccia (1987), quienes documentaron que la duración del movimiento espermático tiende a disminuir a lo largo del período de espermiación.

En especies como la trucha arcoíris (*O. mykiss*), la trucha marrón (*Salmo trutta* L.) y la trucha de arroyo (*Salvelinus fontinalis*, Mitchill), se ha reportado que la duración del movimiento espermático puede reducirse de 30 a 15 s conforme avanza dicho período. Asimismo, Büyükhatipoglu y Holtz (1984), Billard *et al.* (1977) y Methven y Crim (1991) señalaron que tanto la intensidad como la duración de la movilidad espermática presentan variaciones estacionales en la trucha arcoíris, así como en otras especies como la lubina y el fletán del Atlántico. Estas variaciones estacionales pueden influir directamente en la calidad del semen. Por el contrario, en estudios realizados con robalo, Suquet *et al.*

(1994) observaron que, aunque el volumen de espermatozoides disminuye a lo largo de la temporada reproductiva, la duración del movimiento de los espermatozoides no se ve afectada.

En este contexto, los tiempos prolongados registrados en el presente trabajo podrían estar asociados a condiciones ambientales favorables durante el periodo reproductivo, así como a una adecuada preparación fisiológica de los machos utilizados, lo cual se mostró con mayor duración del movimiento espermático.

Comparativamente, Bustamante-González *et al.* (2018) reportaron un pH promedio de 8.07 ± 0.31 y tiempos de movilidad espermática que oscilaron entre 24.22 y 127 s durante la temporada reproductiva de *O. mykiss*. Específicamente, en los mismos meses en los que se llevó a cabo el presente estudio, se documentó un pH promedio de 7.94 ± 0.37 , acompañado de una duración media de movilidad de 64.32 ± 5.82 s. En contraste, los datos obtenidos muestran diferencias notables tanto en el pH como en la duración de la movilidad espermática entre las distintas líneas fenotípicas analizadas: Amanalco (pH 8.06 ± 0.29 , 99 ± 10.66 s), Poblanos (pH 8.25 ± 0.22 , 79.1 ± 10.41 s), H-N (pH 8.12 ± 0.26 , 81.7 ± 10.26 s) y Pool (pH 7.07 ± 0.12 , 92.50 ± 16.07 s). Aunque las diferencias observadas en los valores promedio de pH parecen moderadas, su impacto sobre la movilidad espermática puede ser significativo.

Zilli *et al.* (2004) demostraron que diferencias en la composición lipídica de las mitocondrias y en la integridad de su membrana pueden traducirse en una producción variable de ATP entre individuos, lo cual incide directamente en la duración y vigor del movimiento flagelar. Este hallazgo resulta relevante para interpretar los resultados obtenidos en la presente investigación, particularmente en la línea Pool, la cual mostró una movilidad espermática relativamente elevada (92.50 ± 16.07 s) a pesar de presentar un pH medio significativamente menor (7.07 ± 0.12) en comparación con las otras líneas. Este comportamiento atípico podría sugerir la presencia de mecanismos compensatorios, como una mayor eficiencia en la producción de energía o una expresión diferencial de canales iónicos involucrados en la regulación del pH intracelular, lo cual ha sido descrito en otras especies de peces como una estrategia adaptativa frente a condiciones adversas del medio (Morisawa, 2008; Alavi y Cosson, 2006).

Asimismo, la composición del medio activador es un determinante clave de la movilidad espermática. Estudios como los de Dietrich *et al.* (2005), Cosson (2008) y Nynca *et al.* (2012) han demostrado que el uso de agua como medio activador es eficaz en trucha arcoíris, siempre que se mantengan condiciones fisicoquímicas estables, especialmente en términos de osmolaridad y pH. En este sentido, Dzyuba y Cosson (2014) destacan que la activación flagelar está estrechamente relacionada con la interacción entre el espermatozoide y los iones del medio externo, lo que indica que los canales iónicos de membrana tienen un papel central en la regulación de la movilidad. Esta interacción influye tanto en la duración como en la calidad del movimiento espermático.

En este estudio, el porcentaje de espermatozoides vivos fue alto en todas las líneas fenotípicas evaluadas. Se registraron valores de $99.29 \pm 1.89\%$ en la línea Amanalco, $99.17 \pm 2.04\%$ en Poblano,

98.33 $\pm$ 2.58% en H-N y 95.83 $\pm$ 1.44% en Pool. Aunque las líneas H-N y Pool presentaron valores relativamente más bajos, todos los porcentajes superaron ampliamente el umbral del 90%, considerado un indicador de alta calidad seminal. En *O. mykiss*, se han reportado valores de viabilidad espermática superiores al 80% durante el pico reproductivo (septiembre-noviembre), posiblemente debido a una mayor sincronización endocrina y a una espermatogénesis eficiente (Bustamante-González *et al.*, 2016). Cabe destacar que estos niveles de viabilidad se obtuvieron sin el uso de activadores, lo que indica que los espermatozoides mantenían su integridad estructural y funcional de forma natural, reflejando una destacada aptitud fecundante.

El porcentaje de espermatozoides vivos es un parámetro fundamental para evaluar la integridad de la membrana plasmática, responsable del intercambio iónico y del mantenimiento del equilibrio osmótico, esenciales para la activación de la movilidad y la fecundación (Medina-Robles *et al.* 2020). Una membrana dañada puede comprometer seriamente la capacidad fecundante del gameto, por lo que su evaluación permite inferir no sólo la viabilidad celular, sino también la proporción de espermatozoides funcionales dentro del eyaculado. La presencia de células en apoptosis o con daño celular irreversible también puede explicar la variabilidad en la calidad seminal entre individuos. Chan *et al.* (2012) y Osorio-Pérez (2017) advierten que una proporción elevada de espermatozoides en apoptosis puede reducir significativamente la eficiencia reproductiva, especialmente bajo condiciones de estrés ambiental o durante el almacenamiento prolongado del semen. Por lo tanto, a pesar de las diferencias significativas observadas entre líneas en el presente estudio, la alta viabilidad registrada en todas ellas respalda su utilidad en fertilizaciones artificiales exitosas.

Dzyuba y Cosson (2014) destacan que parámetros como la concentración espermática, la movilidad, el pH y la viabilidad celular son predictores clave del potencial fecundante del semen. Evaluaciones integrales de estos factores no solo permiten seleccionar a los mejores reproductores para programas de reproducción asistida, sino que también contribuyen al diseño de estrategias de manejo reproductivo adaptadas a las condiciones ambientales específicas de cada sistema de cultivo.

Finalmente, la variabilidad estacional en la calidad seminal observada en otras investigaciones subraya la influencia de factores como la temperatura, la duración del fotoperiodo y la disponibilidad de nutrientes en la fisiología reproductiva de peces teleósteos (Bustamante-González *et al.*, 2018; Sahin *et al.* 2014). Por ende, la evaluación constante y multivariable de la calidad espermática resulta esencial para garantizar la eficiencia reproductiva, independientemente de las diferencias individuales o ambientales presentes.

Las diferencias observadas tanto entre individuos como entre estudios, pueden atribuirse a una combinación de factores fisiológicos, genéticos y ambientales (Billard, 1988; Zuromska, 1981). En los peces teleósteos, la calidad seminal está determinada por una compleja interacción entre variables intrínsecas y extrínsecas, lo que explica la variabilidad registrada. Entre las variables intrínsecas destacan la edad, el grado de madurez sexual, el estado nutricional durante la espermatogénesis y el perfil

endocrino asociado al eje reproductivo (Cabrita *et al.*, 2014). Además, la carga genética desempeña un papel fundamental, ya que algunas líneas pueden presentar una mayor capacidad espermatogénica o una mejor tolerancia al estrés reproductivo, como ha sido reportado por Lahnsteiner *et al.* (1998) y Babiak *et al.* (2006).

Estas condiciones influyen en la funcionalidad mitocondrial y en la expresión de proteínas estructurales y regulatorias del axonema flagelar, generando variabilidad en la calidad del plasma seminal, la integridad de la membrana y los niveles de estrés oxidativo, factores que afectan directamente la movilidad espermática (Gallo *et al.*, 2021; Nynca *et al.*, 2019; Zilli *et al.*, 2017; Christen *et al.*, 1987). Mientras que, factores extrínsecos, tales como la temperatura, el fotoperiodo y la calidad del agua, modulan la actividad endocrina y la eficacia de la espermatogénesis (Alix *et al.*, 2020; Bustamante-González *et al.*, 2016). Variables estacionales y las propiedades del medio activador también impactan parámetros como concentración, volumen y movilidad espermática, reflejando posibles adaptaciones fisiológicas a condiciones locales (Franca *et al.*, 2020; Woolsey *et al.*, 2006; Krise *et al.*, 1995). Así, la interacción entre factores ambientales y genéticos determina el éxito reproductivo en sistemas acuícolas.

Por otro lado, las diferencias entre estudios pueden deberse en gran medida a aspectos metodológicos. Factores como el tipo de medio activador, el tiempo entre la extracción del semen (momento de recolección dentro del ciclo reproductivo) y su análisis, las condiciones térmicas durante la evaluación, así como los métodos utilizados para cuantificar la movilidad, pueden introducir sesgos significativos (Bobe y Labbé, 2010; Rurangwa *et al.*, 2004). Estas variaciones dificultan una comparación directa entre investigaciones, y podrían explicar las discrepancias observadas entre los resultados del presente estudio y los reportados por otros autores. Sin embargo, la coincidencia general en los rangos de pH y en la duración de la movilidad espermática sugiere que *O. mykiss* presenta un sistema reproductivo altamente sensible, pero con respuestas relativamente predecibles frente a factores ambientales, lo que abre la posibilidad de optimizar su rendimiento seminal mediante estrategias de manejo ambiental y genético adecuadas (Lahnsteiner *et al.*, 1998; Valdebenito *et al.*, 2011).

En relación con los parámetros de calidad ovocitaria, Vargas (2003) señala que la edad y el peso de las hembras son factores determinantes en el número de ovocitos producidos. En términos generales, hembras jóvenes pueden desovar entre 1,000 y 1,500 ovocitos por kilogramo de peso; mientras que hembras de dos años con un peso aproximado de 1 kg pueden producir alrededor de 2,500 ovocitos, y aquellas de tres años con 2 kg de peso alcanzan hasta 3,500 ovocitos. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde las hembras de la línea fenotípica Z-18, con un peso promedio de 3.153 kg, registraron un promedio de 4,885 ovocitos, en contraste con la línea H-N, que con un peso promedio de 0.829 kg presentó solo 1,318 ovocitos. Además, sugieren que el mayor tamaño corporal de las hembras Z-18 está positivamente correlacionado con una mayor producción ovocitaria.

En cuanto al diámetro promedio de los ovocitos registrados en las líneas fenotípicas Z18 y H-N fueron de 2.41 mm y 2.61 mm, respectivamente. Estos valores reflejan un desarrollo ovocitario avan-

zado; sin embargo, aún se sitúan por debajo del umbral de maduración final establecido por Bromage y Cumaranatunga (1988) y Colihueque y Estay (2018), quienes proponen que los ovocitos con diámetros superiores a 3.2 mm están óptimamente preparados para la ovulación y la fertilización. Por su parte, Toledo *et al.* (1994) reportaron que los ovocitos de trucha arcoíris presentan un rango de crecimiento entre 0.3 y 2.5 mm, con un aumento progresivo en su diámetro entre febrero y abril. Los resultados del presente estudio coinciden con estos valores, lo que indica que las líneas Z18 y H-N siguen un patrón de desarrollo ovocitario similar al descrito para esta especie.

El tamaño del óvulo ha sido considerado un factor crítico en el éxito del desarrollo embrionario, se ha propuesto que un mayor tamaño podría conferir una ventaja en términos de reservas vitelinas y desarrollo larval. No obstante, en el caso específico de la trucha arcoíris, Blanc (2002) y Bobe y Labbé (2010) demostraron que, bajo condiciones controladas de temperatura, envejecimiento postovulatorio y manejo reproductivo, los óvulos de menor tamaño presentan porcentajes de fertilización comparables a las de óvulos de mayor tamaño. Esto sugiere que, si bien el diámetro ovocitario es un marcador útil del estado de maduración, no necesariamente predice con precisión el éxito de la eclosión o la calidad embrionaria (Springate y Bromage, 1985).

Esta variabilidad en el tamaño de los ovocitos podría estar influida por una combinación de factores fisiológicos, genéticos y ambientales. Kamler (2005) y Vilcherrez y Pardo-Figueroa (2022), destacan que factores internos como el estado nutricional y fisiológico de las hembras, el número de ovocitos liberados, la fase del ciclo reproductivo y la genética de la población, junto con variables exógenas como las condiciones del agua la temperatura, la salinidad y la disponibilidad de alimento, así como el manejo durante el cultivo pueden modular la tasa de ovulación, el crecimiento ovocitario y la calidad final del ovocito. En conjunto, estas evidencias subrayan la necesidad de considerar tanto factores internos como externos para optimizar la producción en sistemas acuícolas.

Por último, el color de los ovocitos, se observó que la tonalidad predominante fue el color naranja de la línea Z-18 con un 60%. Esta variación en la pigmentación ovocitaria es un rasgo común, en donde los colores pueden ir desde un amarillo pálido hasta un naranja brillante o incluso rojo intenso. Dichas tonalidades están directamente determinadas por la concentración y el tipo de carotenoides presentes en el vitelo, compuestos lipofílicos de origen dietario que se acumulan durante la vitelogénesis (Wilkins *et al.*, 2017).

Los carotenoides cumplen múltiples funciones biológicas en los peces, entre ellas la protección contra el estrés oxidativo, la estabilización de membranas celulares y la modulación del desarrollo embrionario temprano. Además de su función fisiológica, estos pigmentos también han sido propuestos como indicadores de calidad. Diversos estudios han reportado que una mayor intensidad de coloración en los ovocitos, atribuible a una mayor concentración de carotenoides, se asocia positivamente con el éxito reproductivo, particularmente en términos de fertilización y eclosión bajo condiciones de manejo artificial (Tyndale *et al.*, 2008; Baki *et al.*, 2019).

En este contexto, la alta proporción de ovocitos de color naranja observada en la línea Z-18 podría interpretarse como un indicador fenotípico indirecto de un mayor contenido de carotenoides, compuestos que han sido asociados con un mejor estado nutricional y mayor viabilidad embrionaria. Esta característica sugiere una posible ventaja reproductiva y podría tener implicaciones prácticas en programas de selección de reproductores. La evaluación visual del color ovocitario, al ser una herramienta no invasiva, rápida y de bajo costo, podría integrarse como un criterio complementario para estimar la calidad de las puestas en contextos de reproducción asistida.

Por otro lado, la calidad seminal en *O. mykiss* presenta una alta variabilidad entre individuos, fenómeno ampliamente documentado en la literatura (Billard, 1988; Moccia y Munkittrick, 1987). En el presente estudio, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los machos en ciertos parámetros seminales, los valores registrados fueron funcionalmente adecuados para lograr fecundaciones exitosas, lo cual coincide con lo reportado por Castro-Castellón *et al.* (2017), quienes lograron altas tasas de fertilización utilizando una proporción de 40 g de ovocitos por 800 μ L de semen, activados con 40 mL de solución salina.

Los resultados obtenidos indican que, aunque no existan diferencias estadísticas en la calidad seminal entre líneas o individuos, los valores funcionales pueden ser suficientes para alcanzar tasas de fecundación superiores al 90%, siempre que parámetros clave como la concentración espermática y la movilidad se mantengan dentro de rangos adecuados. En trucha arcoíris, por ejemplo, se ha documentado una reducción del 12% en la capacidad fertilizante del espermatozoide hacia el final del periodo de espermiación, lo que implica una mayor demanda de espermatozoides por ovocito (Moccia y Munkittrick, 1987).

Es así como la combinación gamética entre la línea Amanalco con ovocitos de la línea Z-18/H-N generó una mayor eficiencia reproductiva, evidenciada por un porcentaje de fecundación y eclosión superiores. Esta eficiencia sugiere una mayor compatibilidad entre los gametos de estas líneas, lo cual pudo favorecer una fecundación efectiva y un desarrollo embrionario estable.

Al comparar con los datos reportados por Oliva *et al.* (2022), quienes registraron 97.15 y 92.48% eclosión en líneas distintas, se observa que los resultados obtenidos para la línea Amanalco se acercan más a los valores reportados. Asimismo, la tasa de mortalidad observada durante la eclosión para la línea Amanalco fue ligeramente mayor, en concordancia con lo reportado por González y Aguilar (2015), quienes documentaron un 2.78% de mortalidad al momento de la eclosión.

Las ligeras diferencias en los porcentajes de fertilización entre las líneas podrían estar influenciadas por diversos factores, entre ellos la calidad seminal (particularmente la movilidad, concentración y viabilidad espermática), así como por el grado de compatibilidad entre los gametos (Mylonas *et al.*, 2017). La interacción entre estos factores puede afectar la eficiencia de la unión gamética y la activación del ovocito.

Por otra parte, las variaciones observadas en los porcentajes de eclosión podrían deberse a diferencias intrínsecas en la calidad de los ovocitos, tales como el contenido de reservas vitelinas, la integridad

de la membrana perivitelina, y la capacidad metabólica del embrión en desarrollo (Zavala, 2011; Pérez-Atehortúa, 2025). A esto se suman factores extrínsecos como la temperatura del agua, la oxigenación, el tipo de incubadora y las condiciones de manejo post-fertilización, los cuales son determinantes para asegurar un desarrollo embrionario exitoso (Bobe y Labbé, 2010).

Estas observaciones refuerzan la emergencia de establecer protocolos reproductivos que consideren no sólo la proporción óptima entre ovocitos y semen, sino también el momento del año y las condiciones de manejo, con el objetivo de maximizar la eficiencia reproductiva. La implementación de evaluaciones integrales que incluyan parámetros como movilidad, concentración, volumen y viabilidad espermática resulta esencial para estandarizar los procesos de fertilización en acuicultura, al tiempo que se conserva la calidad genética de las poblaciones de *O. mykiss*.

En conjunto, los hallazgos de este estudio subrayan la necesidad de una selección cuidadosa de las combinaciones fenotípicas entre reproductores, así como de un control riguroso de las condiciones de fertilización e incubación. La línea Amanalco, al presentar un desempeño superior en los parámetros seminales evaluados, y los ovocitos de la línea Z-18, que destacan por su alta producción y calidad, representan una combinación reproductiva altamente eficiente. Esta interacción podría potenciar los esfuerzos en programas de mejoramiento genético y producción sustentable dentro de los sistemas acuícolas especializados en trucha arcoíris.

CONCLUSIÓN

La calidad del semen, la calidad ovocitaria y la correcta ejecución del proceso de fertilización son factores clave para el éxito en los programas de reproducción en acuicultura. En este estudio, los parámetros seminales como la movilidad, concentración espermática y porcentaje de vivos, demostraron ser determinantes para la capacidad fecundante, destacando a los machos de la línea Amanalco como los más sobresalientes en términos de calidad seminal.

Por otro lado, las hembras de la línea Z-18 presentaron una mayor calidad ovocitaria, evidenciada por un mayor número de ovocitos, mejor pigmentación y características morfológicas favorables, factores que contribuyen a un mejor desempeño reproductivo y al éxito en el desarrollo embrionario.

La combinación de machos Amanalco con hembras Z-18/HN resultó ser la más eficiente, al registrar los mejores porcentajes de fertilización entre todas las líneas evaluadas. Estos resultados resaltan la necesidad de una evaluación integral de los reproductores y de una selección genética adecuada, con el objetivo de optimizar los rendimientos y garantizar la sostenibilidad de la producción en especies acuícolas de alto valor comercial como *O. mykiss*.

AGRADECIMIENTOS

Al responsable del centro acuícola “El Zarco” el Biol. Gregorio Hernández Silverio por la autorización del desarrollo de estudios y al personal en general por el trabajo participativo y a los revisores anónimos que aportaron sugerencias para mejorar el documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Alavi, S. M. y J. Cosson, 2006. Sperm motility in fishes. (II) Effects of ions and osmolality: a review en *Cell Biology International*, vol. 30, núm. 1. *Wiley Online Library*, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cellbi.2005.06.004>.
- Alavi, S. M. H., Rodina, M., Policar, T., Kozak, P., Psenicka, M. y O. Linhart, 2007. Semen of *Perca fluviatilis* L.: Sperm volume and density, seminal plasma indices and effects of dilution ratio, ions and osmolality on sperm motility. *Theriogenology*, vol. 68, núm. 2, Elsevier pp. 276-283. https://www.academia.edu/16472533/Semen_of_Perca_fluviatilis_L_Sperm_volume_and_density_seminal_plasma_indices_and_effects_of_dilution_ratio_ions_and_osmolality_on_sperm_motility.
- Alix, M., Kjesbu, O. S. y K. C. Anderson, 2020. From gametogenesis to spawning: How climate-driven warming affects teleost reproductive biology. *Journal of Fish Biology*, vol. 97, núm. 3, Wiley Online Library, pp. 607-632. <https://doi.org/10.1111/jfb.14439>.
- Baki, B., Kaya Öztürk, D. y S. Tomgişi, 2019. The use of egg color of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) as a quality criterion. *Journal of Engineering Research and Application*, vol. 9, núm. 3, ResearchGate, pp. 43-46. https://www.researchgate.net/publication/332606529_The_Use_of_Egg_Color_of_Rainbow_Trout_Oncorhynchus_mykiss_as_a_Quality_Criterion.
- Bastardo, H., Guedez, C. y M. León, 2004. Características del semen de trucha arcoiris de diferentes edades, bajo condiciones de cultivo en Mérida, Venezuela. *Zootecnia Tropical*, vol. 22, núm. 3, Scielo. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-72692004000300006.
- Benau, D., y C. Terner, 1980. Initiation, prolongation, and reactivation of the motility of salmonid spermatozoa, *Gamete Research*, vol. 3, núm. 3, Wiley Online Library, pp. 247-257. <https://doi.org/10.1002/mrd.1120030307>.
- Billard, R., J. Dupont, y G. Barnabé, 1977. Diminution de la motilité et de la durée de conservation du sperme de *Dicentrarchus labrax* L. (Poisson, Téléostéen) pendant la période de spermiation, *Aquaculture*, vol. 11, núm. 4, Elsevier, pp. 363-367. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(77\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0044-8486(77)90086-2).

- Billard, R., J. Cosson, Perchec, G. y O. Linhart, 1995. Biology of sperm and artificial reproduction in carp, *Aquaculture* vol. 129, Elsevier, pp. 95-112. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(94\)00231-C](https://doi.org/10.1016/0044-8486(94)00231-C).
- Billard, R., 1988. Artificial insemination and gamete management in fish, *Marine Behaviour Physiology*, vol. 14, pp. 3-21. <https://doi.org/10.1080/10236248809378690>.
- Blanc, J. M., 2002. Effects of egg size differences on juvenile weight between and within lots in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*. *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 33, núm. 3. Wiley Online Library, pp. 278-286. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1749-7345.2002.tb00504.x>.
- Bobe, J. y C. Labbé, 2010. *Egg and sperm quality in fish. General and Comparative Endocrinology*, vol. 165, núm. 3. ResearchGate, pp. 535-548. https://www.researchgate.net/publication/276267038_Egg_and_sperm_quality_in_fish.
- Bromage, N. y R. Cumaranatunga, 1988. Egg production in the rainbow trout. Muir, J.F., Roberts, R.J. (comps.), Recent Advances in Aquaculture, Springer. *Blackwell Scientific Publications*, Dordrecht, vol. 3, pp. 64-138.
- Bustamante-González, J., Rodríguez-Gutiérrez, M., Cortes-García, A., González-Rentería, M. 2016. Reproductive behavior of male rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) during reproductive period. *Scientific Journal of Animal Science*, vol. 5, núm. 4, pp. 261-267. doi:10.14196/sjas.v5i4.2163
- Bustamante-González, J. D., Cortés-García, A. y M. Rodríguez-Gutiérrez, 2018. Crecimiento y calidad espermática en trucha arcoíris *Oncorhynchus mykiss* (*Teleostei: Salmonidae*) durante la temporada reproductiva. *Hidrobiológica*, vol. 28, núm. 2, Scielo, pp. 163-170, disponible en <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n2/bustamante>.
- Büyükhatoğlu, S., y W. Holtz, 1984. Sperm output in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) effect of age, timing and frequency of stripping and presence of females. *Aquaculture*, vol. 37, núm. 1, Elsevier, pp. 63-71, disponible en [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(84\)90044-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(84)90044-9)
- Cabrita, E., Martínez-Páramo, S., Gavaia, P. J., Riesco, M. F., Valcarce, D. G., Sarasquete, C. y V. Robles, 2014. Factors enhancing fish sperm quality and emerging tools for sperm analysis. *Aquaculture*, vol. 432, Elsevier, pp. 389-401. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.04.034>.
- Castro-Castellón, A., González-Villaverde, P., Cortés-García, A., Martínez-Regalado, D. y J. Jiménez-Valencia, 2017. Calidad del semen en trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) lote Michoacano, a finales de su periodo reproductivo. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente*, vol. 1, núm. 13, ResearchGate, pp. 1-9. https://www.researchgate.net/publication/330292980_Calidad_del_semen_en_trucha_arco_iris_Onchorhynchus_mykiss_lote_Michoacano_a_finales_de_su_periodo_reproductivo.

- Chan, L. L., Wilkinson, A. R., Paradis, B. D. y N. Lai, 2012. *Rapid image-based cytometry for comparison of fluorescent viability staining methods*. J. Fluores, vol. 22, núm. 5, Springer Science, pp. 1301-1311. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10895-012-1072-y>.
- Christen, R., GATTI, J. L., y Billard, R. 1987. Trout sperm motility: the transient movement of trout sperm is related to changes in the concentration of ATP following the activation of the flagellar movement. *European Journal of Biochemistry*, vol. 166, núm. 3, Wiley Online Library, pp. 667-671. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1987.tb13565.x>.
- Colihueque, N. y F. Estay, 2018. Perspectivas para el mejoramiento de la calidad de la ova en la salmonicultura. *Molinai Journal of Science*, vol. 2, núm 2, ResearchGate, pp. 42-60. https://www.researchgate.net/publication/331742096_Perspectivas_para_el_mejoramiento_de_la_calidad_de_la_ova_en_la_salmonicultura_Chilena.
- Corriero, A., Zupa, R., Mylonas, C. C. y L. Passantino, 2021. Atresia of ovarian follicles in fishes, and implications and uses in aquaculture and fisheries. *Journal of Fish Diseases*, vol. 44, núm. 9, Wiley Online Library, pp. 1271-1291. <https://doi.org/10.1111/jfd.13469>.
- Cosson, J. J. 2008. Methods to Analyse the Movements of Fish Spermatozoa and their Flagella. Alavi, S. M. H., Cosson, J. J., Coward, K. y Rafiee, G. (comps.). *Fish spermatology*, Alpha Science, Oxford, pp. 64-102.
- Cosson, J., 2010. Frenetic activation of fish spermatozoa flagella entails short-term motility, portending their precocious decadence. *Journal of fish biology*, vol. 76, núm. 1, Wiley Online Library, pp. 240-279. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2009.02504.x>.
- Dietrich, G. J., Kowalski, R., Wojtczak, M., Dobosz, S., Goryczko, K. y A. Ciereszko, 2005, Motility parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) spermatozoa in relation to sequential collection of milt, time of post-mortem storage and anesthesia. *Fish Physiology Biochemistry*, vol. 31, Springer Nature, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1007/s10695-005-3527-4>.
- Dziewulska, K. y Z. Domagała, 2013. Effect of pH and cation concentrations on spermatozoan motility of sea trout (*Salmo trutta m. trutta* L.). *Theriogenology*, vol. 79, núm. 1, ScienceDirect, pp. 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.09.008>.
- Dzyuba, V. y J. Cosson, 2014. Motility of fish spermatozoa: from external signaling to flagella response. *Reproductive Biology*, vol. 14, núm. 3, Elsevier, pp. 165-175. <https://doi.org/10.1016/j.repbio.2013.12.005>.
- França, T. S., Motta, N. C., Egger, R. C., Oliveira, A. V. y L. D. Murgas, 2020. Impact of activation solutions on fresh and frozen-thawed sperm motility and fertilization success for two species of migratory freshwater fishes. *Theriogenology*, vol. 149, Elsevier, pp. 6-15. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2020.03.016>.
- Gallo, A., Esposito, M. C., Tosti, E. y R. Boni, 2021. Sperm motility, oxidative status, and mitochondrial activity: exploring correlation in different species. *Antioxidants*, vol. 10, núm. 7, MDPI, pp. 1131, disponible en <https://doi.org/10.3390/antiox10071131>.

- Gonzales, L. y J. Aguilar, 2015. Incubación de ovas y supervivencia de larvas de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) a diferentes temperaturas del agua en la piscigranja La Cabaña. *Tesis de Licenciatura en Ingeniería Pesquera*, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huancayo, Perú.
- IMARPE, Instituto del mar del Perú, 2015. Guía para la incubación y alevinaje de trucha arcoiris *Oncorhynchus mykiss*. *Serie de Divulgación Científica*, vol. 1, núm. 3, pp. 1-74. <https://hdl.handle.net/20.500.12958/3009>.
- Kamler, E., 2005. Parent-egg-progeny relationships in teleost fishes: An energetic perspective. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, vol. 15, Springer, pp. 399-421. <https://rdcu.be/eicnt>.
- Kowalski, R. K., y B. I. Cejko, 2019. Sperm quality in fish: Determinants and affecting factors. *Theriogenology*, vol. 135, Elsevier, pp. 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2019.06.009>.
- Krise, W. F., Hendrix, M. A., Bonney, W. A. y S. E. Baker-Gordon, 1995. Evaluation of sperm-activating solutions in atlantic salmon *Salmo salar* fertilization tests. *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 26, núm. 4, Wiley Online Library, pp. 384-389. <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00833.x>.
- Lahnsteiner, F., Berger, B., Weismann, T., y R. A. Patzner, 1998. Determination of semen quality of the rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*, by sperm motility, seminal plasma parameters, and spermatozoal metabolism. *Aquaculture*, núm. 163, Elsevier, pp. 163-181, disponible en [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00243-9).
- Liu, C. H., Dong, H. B., Ma, D. L., Li, Y. W., Han, D., Luo, M. J., Chang, Z. L. y J. H. Tan, 2016. Effects of pH during liquid storage of goat semen on sperm viability and fertilizing potential. *Animal Reproduction Science*, vol. 164, Elsevier, pp. 47-56, disponible en <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2015.11.011>.
- López-Hernández, J., Osorio-Pérez, A., Jiménez-Félix, S., Páramo-Delgadillo, S., Márquez-Couturier, G., Yasui, G., y L. Arias-Rodríguez, 2018. Review article: Fish sperm quality and assessment methods. *Journal of Marine and Coastal Sciences*, vol. 10, núm. 1, ResearchGate, pp. 67-96. <https://doi.org/10.15359/revmar10-1.5>.
- Medina-Robles, V. M., Duarte-Trujillo, A. S. y P. E. Cruz-Casallas, 2020. Crioconservación seminal en peces de agua dulce: aspectos biotecnológicos, celulares y bioquímicos. *Orinoquia*, vol. 24, núm. 2, pp. 51-7, disponible en https://www.researchgate.net/publication/348822414_Crioconservacion_seminal_en_peces_de_agua_dulce_aspectos_biotecnologicos_celulares_y_bioquimicos.
- Methven, D. A., y L. W. Crim, 1991. Seasonal changes in spermatocrit, plasma sex steroids and motility of sperm from Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*). *Proceedings of the 4th International Symposium on the Reproductive Physiology of Fish*, vol. 170, University of East Anglia, Reino Unido.

- Morisawa, M., 2008. Adaptation and strategy for fertilization in the sperm of teleost fish. *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 24, núm. 4, Wiley Online Library, pp. 362-370. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2008.01126.x>
- Moccia, R. D. y K. R. Munkittrick, 1987. Relationship between the fertilization of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) eggs and the motility of spermatozoa. *Theriogenology*, vol. 27, núm. 4, Elsevier, pp. 679-688. [https://doi.org/10.1016/0093-691X\(87\)90061-6](https://doi.org/10.1016/0093-691X(87)90061-6).
- Munkittrick, K. R., y R. D. Moccia, 1987. Seasonal changes in the quality of rainbow trout (*Salmo gairdneri*) semen: effect of a delay in stripping on spermatocrit, motility, volume and seminal plasma constituents. *Aquaculture*, vol. 64, núm. 2, Elsevier, pp. 147-156, . [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(87\)90350-4](https://doi.org/10.1016/0044-8486(87)90350-4).
- Mylonas, C. C., Duncan, N. J. y J. F. Asturiano, 2017. Hormonal manipulations for the enhancement of sperm production in cultured fish and evaluation of sperm quality. *Aquaculture*, vol. 472, Elsevier, pp. 21-44. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.04.021>.
- Navarro, O. J., Velasco-Santamaria, Y. M. y P. E. Cruz-Casallas, 2004. Evaluación de cinco protectores para la criopreservación de semen de Cachama Blanca (*Piaractus brachipomus*). *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, vol. 17, núm. 4, Redalyc, pp. 53-59, disponible en <https://doi.org/10.17533/udea.rccp.323960>.
- Nynca, J., G. J. Dietrich, H. Kuzminski, Dobosz, S. y A. Ciereszko, 2012. Motility activation of rainbow trout spermatozoa at pH 6.5 is directly related to contamination of milt with urine. *Aquaculture*, vol. 300, Elsevier, pp. 185-188. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.12.023>.
- Nynca, J., Słowińska, M., Judycka, S. y A. Ciereszko, 2019. Maladaptation of trout spermatozoa to fresh water is related to oxidative stress and proteome changes. *Reproduction*, vol. 157, núm. 6, PubMed, pp. 485-499. <https://doi.org/10.1530/REP-19-0012>.
- Oliva, M., Avis, R., Mori, R., Yuji, R. y V. Fernández, 2022. Producción de alevinos de trucha dorada (*Oncorhynchus aguabonita*) bajo control de temperatura en la etapa de eclosión de ovas embrionadas en la estación acuícola terranova. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, vol. 6, núm. 1, ResearchGate, pp. 36-42, disponible en <https://www.researchgate.net/publication/362305480>.
- Osorio-Pérez, A., 2017. *Fisiología y microestructura espermática del pejelagarto tropical Atractosteus tropicus*. Tesis de Licenciatura no publicada, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Villahermosa, Tabasco, México.
- Peña, R., 2015. Criterios de calidad de huevos y sus implicaciones en el cultivo de peces marinos. *Nutrición acuícola: Investigación y Desarrollo*, pp 402-434. <https://nutricionacuicola.uanl.mx/index.php/acu/article/view/54>.
- Peralta-Martínez, M. A., Romo-García, S., Kjelland, M. E. y H. González-Márquez, 2018. Efecto del pH de cinco soluciones extensoras sobre la movilidad espermática en trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*).

- chus mykiss*). *Hidrobiológica*, vol. 28, núm. 2, Scielo pp. 171-178 <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n2/paralta>.
- Pérez-Atehortúa, M., Sandoval-Vargas, L., Risopatrón, J., Farías, J., Villalobos, E. F. y I. Valdebenito, 2025. Assessment of some egg quality parameters and chorion ultrastructure characterization in Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Aquaculture*, 594, Elsevier, 741371, disponible en <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.741371>.
- Pérez-Miranda, R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A. y V. Arreola-Padilla, 2013. Escenarios de la distribución potencial de *Pinus patula* Schlt. et Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. con modelos de cambio climático en el Estado de México. *Rev. mex. de cienc. forestales*, vol. 4, núm. 15, Scielo, pp. 73-86, disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n15/v4n15a6.pdf>.
- Perchec, G., Cosson, J., Andre, F. y R. Billard, 1993. Spermatozoa motility of trout (*Oncorhynchus mykiss*) and carp (*Cyprinus carpio*). *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 9, ResearchGate, pp. 129-149, disponible en https://www.researchgate.net/publication/278862530_Spermatozoa_motility_of_trout_Oncorhynchus_mykiss_and_carp_Cyprinus_carpio/citation/download.
- Rurangwa, E., Kime, D. E., Ollevier, F. y J. P. Nash, 2004. The measurement of sperm motility and factors affecting sperm quality in cultured fish. *Aquaculture*, vol. 234, núm. 1-4, Elsevier, pp. 1-28, disponible en <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.12.006>.
- SADER, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018. *Centro Acuicola el Zarco, referente Nacional en la producción de trucha, cumple 75 años*. Gobierno de México, disponible en <https://www.gob.mx/agricultura/edomex/articulos/centro-acuicola-el-zarco-referente-nacional-en-la-produccion-de-cumple-75-anos?idiom=es>, consultado el 14/12/2024.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2023. *Anuario Estadístico Acuicultura y Pesca. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca*. https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2023/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2023.pdf, consultado el 20/06/2024.
- Sahin, T., I. Z. Kurtoglu y F. Balta, 2014. Quantitative characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) semen throughout the reproductive season. *Turkish Journal of Science and Technology*, vol. 26, núm. 1, ResearchGate, pp. 81-87. https://www.researchgate.net/publication/281449247_Quantitative_Characteristics_of_Rainbow_Trout_Oncorhynchus_mykiss_Semen_Throughout_the_Reproductive_Season_T_SAHIN_I_Z_KURTOGLU_F_BALTA.
- Suquet, M., R. Billard, J. Cosson, G. Dorange, L. Chauvaud, C. Mugnier, y C. Fauvel, 1994. Sperm features in turbot (*Scophthalmus maximus*): a comparison with other freshwater and marine fish species. *Aquatic Living Resources*, vol. 7, núm. 4, EDP Sciences, pp. 283-294. <https://doi.org/10.1051/alr:1994031>

- Springate, J. R. C., y N. R. Bromage, 1985. Effects of egg size on early growth and survival in rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson). *Aquaculture*, vol. 47, núm. 2-3, Elsevier, pp. 163-172. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(85\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0044-8486(85)90062-6).
- Toledo D., M., Vivar M., V. y H. C. Muga, 1994. Ciclo gonadal de hembras reproductoras de trucha arcoiris (*Oncorhynchus mykiss*) en la piscicultura de Río Blanco, Los Andes, Chile. *Investigaciones Marinas, Valparaíso*, vol. 22, ResearchGate, pp. 39-43. https://www.researchgate.net/publication/237507328_Ciclo_gonadal_de_hembras_reproductoras_de_trucha_arcoiris_Oncorhynchus_mykiss_en_la_piscicultura_de_Rio_Blanco_Los_Andes_Chile.
- Tyndale, S. T., Letcher, R. J., Heath, J. W. y D. D. Heath, 2008. Why are salmon eggs red? Egg carotenoids and early life survival of Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*). *Evolutionary Ecology Research*, vol. 10, núm. 8, ResearchGate pp. 1187-1199. https://www.researchgate.net/publication/285965341_Why_are_salmon_eggs_red_Egg_carotenoids_and_early_life_survival_of_Chinook_salmon_Oncorhynchus_tshawytscha.
- Valdebenito, I., Bariles, J., Vega, R., Dantagnan, P., Bórquez, A. y E. Carreño, 1995. Análisis cualitativo y cuantitativo del semen de puye Gawlias maculatus (Jenyns, 1842) (*Salmoniformes:galaxiidae*). *Biología Pesquera*, vol. 24, ResearchGate, pp. 17-21. <https://doi.org/10.21703/0067-8767.1995.24.2575>.
- Valdebenito, I., Paivaa, L. y M. Berland, 2011. Atresia folicular en peces teleósteos: una revisión. *Archivos de Medicina Veterinaria*, vol. 43, Scielo, pp. 11-25. <http://dx.doi.org/10.4067/S0301-732X2011000100003>.
- Vargas, R., 2003. Evaluación de la reproducción de trucha arco iris (*Oncorhynchus mykiss*) producida en Costa Rica. I parte. *Agronomía mesoamericana*, vol. 14, núm. 1, Redalyc, pp. 123-127. <https://www.redalyc.org/pdf/437/43714117.pdf>.
- Vega-Ramírez, M. T., Moreno-Lafont, M. C., Valenzuela, R., Cervantes-Olivares, R., Aller-Gancedo, J. M., Fregeneda-Grandes, J. M., Damas-Aguilar, J. L., García-Flores, V. y R. López-Santiago, 2013. New records of Saprolegniaceae isolated from rainbow trout, from their eggs, and water in a fish farm from the State of México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* vol. 84, Scielo, pp. 637-649. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v84n2/v84n2a20.pdf>.
- Vilcherrez-Lozada, J. y L. Pardo-Figueroa, 2022. Reproducción de trucha arco iris con aplicación de fotoperiodo y evaluación de su eficacia en la producción de ovas en la empresa Marandes EIRL de Lagunillas, Puno. *TecnoHumanismo*, vol 2, núm. 2, Dialnet, pp. 262-281. <https://doi.org/10.53673/th.v2i6.142>.
- Wilkins, L. G., Marques da Cunha, L., Glauser, G., Vallat, A. y C. Wedekind, 2017. Environmental stress linked to consumption of maternally derived carotenoids in brown trout embryos (*Salmo trutta*). *Ecology and Evolution*, vol. 7, núm. 14, Wiley Online Library, pp. 5082-5093. <https://doi.org/10.1002/ece3.3076>.

- Woolsey, J., Holcomb, M., Cloud, J. G. y R. L. Ingermann, 2006. Sperm motility in the steelhead *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum): influence of the composition of the incubation and activation media. *Aquaculture Research*, vol. 37, núm. 3, Wiley Online Library, pp. 215-223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2005.01419.x>.
- Zavala, I., 2011. *Caracterización bioquímica del consumo de reservas vitelinas en peces teleósteos de ontogenia indirecta*. REDVET. *Revista electrónica de Veterinaria*, vol. 12, núm. 3, Redalyc, pp. 1-32. <https://www.redalyc.org/pdf/636/63616934008.pdf>.
- Zilli, L., Schiavone, R., Zonno, V., Storelli, C. y S. Vilella, 2004. Adenosine triphosphate concentration and β -d-glucuronidase activity as indicators of sea bass semen quality. *Biology of reproduction*, vol. 70, núm. 6, ResearchGate, pp. 1679-1684. https://www.researchgate.net/publication/8695266_Adenosine_Triphosphate_Concentration_and_-D-Glucuronidase_Activity_as_Indicators_of_Sea_Bass_Semen_Quality.
- Zilli, L., Schiavone, R. y S. Vilella, 2017. Role of protein phosphorylation/dephosphorylation in fish sperm motility activation: state of the art and perspectives. *Aquaculture*, vol. 472, Elsevier, pp. 73-80, disponible en <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2016.03.043>.
- Zuromska, H., 1981. Effect of different thermal regimes on reproductive cycles of tench, *Tinca tinca* (L.). Part VI. Estimation of milt quality. *Polish Archives of Hydrobiology*, vol. 28, pp.

Dependencia de las importaciones de fertilizantes y ventaja comparativa revelada 2016-2023: Perspectivas para México y Ecuador

Robert Carcamo Mallen¹, Claudia Coral¹, Caroline Hambloch²,
Adolfo Guadalupe Álvarez Macías³

Resumen. *La dependencia de las importaciones de fertilizantes de muchos países de renta baja y media sigue generando vulnerabilidad en la productividad agropecuaria y en la seguridad alimentaria. En este documento se analizan las ventajas comparativas de los fertilizantes para México y Ecuador y se formulan recomendaciones de política pública claves para reducir la dependencia de importaciones de ambos países. Tras analizar la ventaja comparativa revelada, la intensidad de las importaciones y las respuestas de política pública, se ha detectado que tanto México como Ecuador carecen de ventajas comparativas en la producción de fertilizantes nitrogenados y potásicos. Sin embargo, Ecuador posee una ventaja comparativa en la producción de fertilizantes fosfatados, que se atribuye a las reexportaciones de Rusia a Chile. Se concluye que tanto México como Ecuador deben priorizar la diversificación y la inversión en alternativas sostenibles, como fomentar la producción de fertilizantes orgánicos para mitigar vulnerabilidades de la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Además, es preciso diversificar los flujos de fertilizantes de otros socios comerciales para atenuar los riesgos sobre la oferta nacional.*

Palabras clave: Dependencia, Fertilizantes, Ventaja Comparativa Revelada, Políticas Públicas, Ecuador, México.

¹ Humboldt-Universität zu Berlin, Departamento de Economía Agrícola, Manejo de Cadenas de Valor Agroalimentarias, Berlin, Alemania. correo electrónico: claudia.coral@hu-berlin.de, carcamor@hu-berlin.de

² Universität Bonn, Instituto de Estudios Orientales y Asiáticos, Bonn, Alemania. correo electrónico: caroline.hambloch@uni-bonn.de

³ Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Departamento de Producción Agrícola y Animal, correo electrónico: aalvarez@correo.xoc.uam.mx

Summary. *The dependence on fertilizer imports by many low- and middle-income countries continues to generate vulnerability in agricultural productivity and food security. This paper analyzes the comparative advantages of fertilizers for Mexico and Ecuador, and subsequently proposes key public policy recommendations to reduce both countries' dependence on imports. After analyzing revealed comparative advantage, import intensity, and public policy responses, it was found that neither Mexico nor Ecuador has a comparative advantage in the production of nitrogen-based or potassium-based fertilizers. However, Ecuador does have a comparative advantage in the production of phosphate-based fertilizers, attributed to re-exports from Russia to Chile. The conclusion is that both Mexico and Ecuador should prioritize diversification and investment in sustainable alternatives, such as promoting the production of organic fertilizers, to mitigate vulnerabilities in agricultural production and food security. Additionally, it is essential to diversify fertilizer supply sources from other trade partners to reduce risks to domestic supply.*

Keywords: *Fertilizer Dependence, Revealed Comparative Advantage, Policy Responses, Ecuador, Mexico.*

INTRODUCCIÓN

Los fertilizantes son un insumo fundamental para la producción agrícola y pecuaria y, por ende, para la seguridad alimentaria. Muchos países de ingreso mediano y bajo no cuentan con la infraestructura ni el equipo necesarios para producir este tipo de agroquímicos y, por lo tanto, dependen de la importación de fertilizantes de un número limitado de países (Hernández y Torero, 2013). En 2022, Rusia, Canadá y China fueron los principales exportadores de fertilizantes, con un 13%, 10% y 9% de las exportaciones mundiales, respectivamente (IICA, 2023). La dependencia de fertilizantes importados se ha identificado como un factor que aumenta la vulnerabilidad de los países respecto a la producción agrícola, la productividad y la seguridad alimentaria (Dimkpa *et al.*, 2023). Esta vulnerabilidad se ha agravado en los últimos años por la interrupción de las cadenas de suministros derivadas de las tensiones geopolíticas y las fluctuaciones de precios, con tendencias alcistas en los últimos años (Belhadi *et al.*, 2024).

En especial, la guerra entre Rusia y Ucrania provocó un aumento de los precios de los fertilizantes y causó interrupciones en el suministro de fertilizantes al tratarse de dos países exportadores. Desde principios de 2020, los precios de los fertilizantes se han triplicado y mantienen su volatilidad, lo que limita que muchos pequeños agricultores accedan a un suministro estable de estos insumos (Hebebrand y Laborde, 2023; Banco Mundial, 2022). Esto, a su vez, ha reducido los rendimientos agrícolas, ha aumentado los precios de los alimentos y la inflación en muchos países de renta baja y media, lo que revela la vulnerabilidad de los países dependientes de las importaciones ante las crisis comerciales que se siguen manifestando en el mundo (Abay *et al.*, 2023; Zhan *et al.*, 2023; Jones y Nti, 2002; Hebebrand y Glauber, 2023).

Por ello es necesario el entendimiento de la viabilidad de las propuestas estratégicas fundamentales planteadas tanto por organismos gubernamentales nacionales e internacionales como por la comunidad académica, en respuesta a la guerra entre Rusia y Ucrania: sobre la necesidad de disminuir la vulnerabilidad asociada a la dependencia de importaciones de fertilizantes y de fortalecer las capacidades de producción nacional de estos insumos agrícolas esenciales (Abay *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2023). En este contexto, el análisis se centra en la evaluación crítica de la dependencia de las importaciones de fertilizantes y en la exploración de la ventaja comparativa revelada en los sectores agrícolas de Ecuador y México, que son casos relevantes porque ambas economías siguen dependiendo de la agricultura en términos de contribución al PIB y de los medios de subsistencia.

En México, la contribución de la agricultura al PIB ha aumentado ligeramente desde el año 2000, pasando del 3,3% al 3,9% en 2021. A pesar del descenso observado en las dos últimas décadas, la participación de la agricultura en el empleo total sigue siendo comparativamente alta, con más del 12,2% en 2021 (OCDE, 2023). Los dos sectores son de particular importancia en cuanto al uso de fertilizantes: en primer lugar, la producción de cereales como maíz, trigo, sorgo, caña de azúcar, que contribuyen a la seguridad alimentaria y, en segundo lugar, el sector de hortalizas y frutas de exportación, que generan una alta demanda de empleo y de divisas (Lema *et al.*, 2022). Por su parte, el sector agropecuario de Ecuador aportó 8% a la producción total entre 2021 y 2022 (Lara *et al.*, 2022). Los principales cultivos que dependen de fertilizantes importados, entre los permanentes, la palma, la caña de azúcar, el banano y el café; y entre los cultivos cíclicos, el arroz, el algodón, la papa y el maíz blanco (MPCEIP, 2024). Cabe destacar que la producción de banano representó alrededor del 16% del total de las exportaciones no petroleras de Ecuador en 2024 (BCE, 2024).

En México, el 60% de la demanda nacional de fertilizantes nitrogenados se satisface mediante importaciones, mientras que en Ecuador todo el suministro es importado (SAGARPA, 2022 y Bucheli, 2020). En este análisis se diferencian también los tres principales tipos de fertilizantes sintéticos: nitrogenados, fosfatados y potásicos. México tiene una dependencia relativamente alta de las importaciones de fertilizantes fosfatados procedentes de Estados Unidos, mientras que Ecuador depende en gran medida de las importaciones de fertilizantes fosfatados y potásicos desde Rusia.

El artículo se organiza en seis apartados: en el segundo se revisa la literatura sobre el índice de ventaja comparativa revelada (IVCR) y presenta un estudio de caso centrado en los riesgos potenciales asociados con la dependencia de las importaciones y la susceptibilidad a los choques externos. El tercer apartado presenta la metodología, incluido el diseño del estudio empírico y las limitaciones de los datos disponibles. El siguiente contiene los resultados derivados del análisis de VCR, mientras que en el quinto se discuten las principales implicaciones sobre la dependencia de los fertilizantes. En la última parte se exponen las conclusiones más relevantes del análisis y se establecen recomendaciones orientadas a la formulación de políticas públicas.

REVISIÓN DE LITERATURA

La teoría de la ventaja comparativa sigue siendo relevante en el ámbito del pensamiento económico y la formulación de políticas. Según esta teoría, los países deben especializarse en la producción y exportación de bienes en los que tengan una ventaja comparativa, es decir, que puedan producir de forma más eficiente que otros países. Factores como la productividad relativa, la dotación de factores y las políticas gubernamentales suelen incidir en esta especialización de los sectores agrícolas y de los fertilizantes. En este último sector, la ventaja comparativa puede verse influida por factores como las diferencias en el consumo de fertilizantes y las tasas de uso entre países, los niveles de inversión pública y apoyo a la productividad agrícola (como las subvenciones y la inversión en investigación y desarrollo), las distorsiones comerciales y las intervenciones gubernamentales que limitan la capacidad de la ventaja comparativa para dictar pautas comerciales y las ventajas competitivas, como los costos de producción y los precios (Ilinova *et al.*, 2021).

Balassa (1965) fue pionero en el concepto de ventaja comparativa revelada (VCR), la cual se expresa a través del flujo del comercio de bienes, ya que el intercambio pone de manifiesto los costes relativos y otros factores que intervienen en las transacciones comerciales (Heredia y Huarachi, 2009). Un enfoque común consiste en medir la ventaja comparativa a través del índice de VCR (Chen *et al.*, 2020). La VCR puede utilizarse para medir los resultados comerciales de varias formas: comparando el valor calculado con el punto neutro o de sectores determinados utilizando el valor calculado y comparando el valor calculado a nivel nacional o regional (Zhang y Sun, 2022). La VCR se ha utilizado habitualmente para analizar datos comerciales y mostrar así la ventaja comparativa de las naciones (Cerdeira *et al.*, 2008), lo que permite revelar ventajas comparativas que no son directamente observables a partir de los datos. Al estimar la VCR, también se pueden detectar desigualdades en la dotación y el uso de los factores productivos, así como en indicadores como los niveles de renta, la eficiencia, la evaluación de las políticas públicas y las estructuras de mercado (Infante Jiménez, y López Villaseñor, 2019).

Este índice también mide la relevancia de un producto (Quintero-Ramírez *et al.*, 2020) y ayuda a analizar el grado de especialización de una región, país o bloque económico en un producto o sector productivo (Calmon *et al.*, 2020). Sin embargo, a pesar de sus ventajas, algunos autores han identificado ciertas desventajas: podría estar sesgado hacia una fuente de ventaja comparativa en países o productos (Yeats, 1985), y podría mostrar simplemente cambios desproporcionados en el tamaño del mercado en lugar de indicar cambios en la ventaja comparativa (Van Rensselaer, 2022). No obstante, Lectard y Rougier (2018) concluyeron que el uso de la ventaja comparativa revelada puede ayudar a los países a tomar decisiones informadas respecto a su estructura de exportación. Al identificar los sectores con dicha ventaja, los países pueden centrarse en desarrollar capacidades nacionales y reducir la dependencia de las importaciones, lo que reduce la vulnerabilidad ante las eventuales rupturas en la cadena de suministro global.

La VCR también permite comparar las ventajas y (des)ventajas de los productos y países a lo largo del tiempo (Costinot *et al.*, 2015; Delgado, 2020; Contreras y Leos, 2021). Al abordar las limitaciones de la VCR tradicional e incorporar otros factores influyentes, este enfoque puede proporcionar un análisis más sólido y detallado de las ventajas comparativas de un país y sus implicaciones para la política económica y las estrategias comerciales. Por ello, en primer lugar, se evalúa la evolución de la dependencia de las importaciones de fertilizantes en Ecuador y México y; en segundo lugar, se identifican los principales países proveedores. Estos resultados se integran con el análisis de la Ventaja Comparativa Revelada (VCR), lo que permite determinar las implicaciones asociadas a la desventaja comparativa de cada país.

MÉTODO DE TRABAJO

Este análisis se divide en dos partes, en la primera, mediante una revisión bibliográfica, se caracteriza el contexto y las respuestas políticas a la crisis de los altos precios de los fertilizantes en México y Ecuador. En la segunda parte, el análisis de datos estadísticos procedentes de fuentes secundarias permite examinar la estructura y los flujos del mercado actual y facilita la medición de la ventaja comparativa de México y Ecuador.

Las ventajas comparativas suelen medirse con el IVCR, a partir de los flujos comerciales y, en algunos casos, con datos del PIB. El IVCR permite analizar y medir los datos comerciales y la ventaja comparativa de las naciones. El índice compara la parte de las exportaciones de un sector determinado en un país con la parte de las exportaciones de ese sector en el mercado mundial.

$$IVCR_{ij} = (X_{ij} / X_i) / (X^w_j / X^w)$$

IVCR_{ij}: Índice de Ventaja Comparativa Revelada del país i para el producto j

X_{ij}: Valor de las exportaciones del país i del producto j

X_i: Valor total de las exportaciones del país i

X^w_j: Valor de las exportaciones mundiales del producto j

X^w: Valor total de las exportaciones mundiales

Índice de Intensidad de Importación (III). El III es una versión transformada del IVCR, que identifica los productos que una región o país importa en mayor medida (Pérez-Cárdenas *et al.*, 2004). Este índice mide la relevancia de las importaciones dentro de la producción de un sector en particular. Compara la proporción de importaciones de un determinado sector en un país con la proporción de importaciones de ese mismo sector en el mercado global.

$$II_{ij} = (M_{ij} / M_i) / (M^w_j / M^w)$$

III_{ij}: Índice de Intensidad de Importación del país i para el producto j

M_{ij}: Valor de las importaciones del país i del producto j

M_i: Valor total de las importaciones del país i

M^w_j: Valor de las importaciones mundiales del producto j

M^w: Valor total de las importaciones mundiales

Para el cálculo de los índices mencionados, se utilizó la base de datos de las Naciones Unidas (UN Comtrade), la cual proporciona información detallada sobre el comercio internacional de bienes, clasificados según la posición arancelaria. Para esta investigación, se empleó la codificación de seis dígitos del Sistema Armonizado 2007 con el fin de clasificar los distintos tipos de fertilizantes. Los valores comerciales se expresan en precios FOB (Libre a Bordo), lo cual resulta fundamental para facilitar la interpretación y comparación de los resultados para el periodo de 2018 a 2023. Asimismo, los fertilizantes se agrupan en tres categorías principales: nitrogenados, fosfatados y potásicos. La Tabla 1 presenta un resumen de la clasificación arancelaria para cada uno de los grupos de fertilizantes para México y Ecuador.

Tabla 1. Grupo de clasificación de los fertilizantes según los códigos del sistema armonizado (SA) utilizados en UN Comtrade

Producto	Código HS
Grupo 1. Fertilizantes nitrogenados simples	
Urea	310210
Sulfato de amonio	310221
Nitrato de amonio	310230
Nitrato de amonio cálcico y demás mezclas con carbonato de calcio	310240
Nitrato de sodio	310250
Soluciones de urea y nitrato de amonio	310280
Amoniaco anhidro	281410

Otros abonos nitrogenados (n.e.c.).	281420, 310260, 282710, 283410, 310229, 310290, 310270 (HS 92-02)
Grupo 2. Fertilizantes fosfatados simples	
Roca fosfórica	2510
Superfosfatos con más del 35%	310310, 310311 (SA 17)
Otros superfosfatos	310319 (SA 17)
Otros fertilizantes fosfatados, n.c.p.	310390, 310320 (SA 92-02)
Grupo 3. Fertilizantes potásicos simples	
Cloruro de potasio	310420
Sulfato de potasio (sulfato de potasa)	310430
Otros fertilizantes potásicos, n.c.p.	310490, 310410 (SA 92-02)
Grupo 4. Fertilizantes compuestos	
Fertilizantes NPK	310520
Fosfato diamónico	310530
Fosfato monoamónico	310540
Otros compuestos NP	310551, 310559
Nitrato de potasio	283421
Otros compuestos NK	—
Compuestos PK	310560
Grupo 5. Otros fertilizantes	
Fertilizantes n.c.p.	310510, 310590

Fuente: Adaptado de FAO y UN Comtrade, 2024.

Nota: "n.c.p." significa "no clasificados previamente" o "no comprendidos en otra parte" (n.e.c. en inglés: "not elsewhere classified").

Estudios de caso de México y Ecuador

La industria de los fertilizantes en México experimentó una importante transformación entre los años sesenta y noventa. Comenzó en 1943 con tres empresas privadas que posteriormente fueron absorbidas por el gobierno mexicano para formar la empresa estatal Fertilizantes Mexicanos (Fertimex) entre 1965 y 1967. Sin embargo, entre 1991 y 1992, el gobierno federal decidió privatizar esta última, lo que incluyó la venta de la infraestructura y las existencias de productos para su comercialización (Alvarado y Castillo, 1996; Fernández, 2008). Fertimex se privatizó totalmente en 1992 y, posteriormente, el gobierno la dividió en trece unidades de producción que fueron adquiridas por siete grupos empresariales.

Durante ese periodo, las importaciones de fertilizantes a México estuvieron fuertemente reguladas, ya que se requerían permisos previos de importación y se pagaban elevados aranceles. Los agricultores recibían diversas formas de ayuda, como precios subvencionados de los fertilizantes. El Estado controlaba la producción y distribución de este insumo y no había correlación entre los precios nacionales e internacionales (Euan-Ávila *et al.*, 2006). A nivel internacional, el gobierno mexicano promovió la liberalización del comercio, reduciendo los aranceles de la mayoría de los productos importados y eliminando la mayoría de los permisos de importación.

A finales de 1993, México firmó el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) con sus socios comerciales, Estados Unidos y Canadá (Euan-Ávila *et al.*, 2006). La privatización de la empresa estatal, combinada con la liberalización del comercio y las operaciones selectivas de crédito agrícola, provocó una transformación radical del mercado de fertilizantes. Se pasó de un mercado de precios controlados con un proveedor y zonas de venta protegidas a un mercado de libre competencia. El aumento de las importaciones y la aparición de nuevos distribuidores se convirtieron en la nueva realidad del mercado nacional. Por lo que respecta a la oferta, los empresarios nacionales de producción y distribución de fertilizantes se enfrentaron a la competencia de empresas internacionales para abastecer el mercado nacional. Cuando los precios internacionales eran altos, la oferta nacional se encontraba en una posición de ventaja. Sin embargo, a partir de 1997, con los precios internacionales deprimidos, la producción nacional se volvió poco competitiva, lo que condujo a una sustitución de la oferta nacional por importaciones.

Mientras que Ecuador históricamente ha sido un importador neto de fertilizantes debido a la falta de materias primas y a la ausencia de la infraestructura para su producción. La única producción conocida de fertilizantes ricos en nutrientes ha sido la de fertilizantes orgánicos de origen animal o vegetal, pero en pequeña escala. A pesar de ello, Ecuador también ha desarrollado una importante industria agrícola comercial centrada en cultivos de exportación como banano, cacao y café (Llieve *et al.*, 2015).

Debido a esta dependencia, cualquier variación significativa en los precios de los fertilizantes en el mercado internacional suele impactar en los costos de producción y los precios de los alimentos. Esto es especialmente cierto si se tiene en cuenta que los fertilizantes representan entre el 10% y el 30% de los costes de producción en Ecuador. Este efecto fue documentado por Jácome *et al.* (2009) con datos de

2008, como consecuencia del aumento en los precios de los fertilizantes, provocado a su vez por el alza en el precio del barril de petróleo, lo que también repercutió en los precios de los alimentos.

Cabe destacar también el efecto oligopólico del mercado mundial, pues en 2015, grandes conglomerados como BASF, Bayer, DowDupont y ChemChina controlaban el 75% del mercado de agroquímicos (y el 63% de las semillas), mientras que tres multinacionales cubrían el 31% del mercado de fertilizantes: Agrium, Yara y Mosaic (Grupo ETC, 2016).

Limitaciones de los datos

Los datos utilizados en esta investigación se realizaron con corte a mayo de 2024 y el análisis se limitó para el periodo de 2018 a 2023, para no contemplar las estadísticas incompletas de 2024. Los datos de producción cuantifican el volumen de productos fabricados dentro de un país y es posible que algunos fertilizantes procedan de la conversión de otros, categorizados como producción secundaria (FAO, 2024).

Los datos comerciales sobre importaciones y exportaciones proceden de UN Comtrade. Las cifras totales del comercio de nutrientes suelen obtenerse a partir de la información sobre productos específicos proporcionada por UN Comtrade y se añaden en este ámbito. Es importante señalar que los datos comunicados directamente a Comtrade por los distintos países se consideran oficiales y se marcan con una bandera de «A». Por el contrario, los datos que incorporan estimaciones de UN Comtrade se marcan con una «X». En caso de que falten datos, se pueden utilizar datos «espejo» de los socios comerciales para rellenar huecos y se marcan con una «E» (UN Comtrade, 2024, p. 2).

RESULTADOS

Evolución de los precios de los fertilizantes en México y Ecuador

En 2022, los precios nacionales de los fertilizantes aumentaron en línea con el alza de los precios internacionales, impulsada por varios factores, entre ellos el encarecimiento de los combustibles, especialmente el gas, insumo clave en la producción de fertilizantes. Lo anterior, se agudizó por la guerra de Rusia y Ucrania y las limitadas exportaciones tanto de gas como de fertilizantes al mercado internacional. A lo largo de 2022, la mayoría de los precios aumentaron más de un 100% en comparación con 2020. En México, el mayor aumento se observó en la urea, con un incremento del 161%, mientras que en Ecuador el cloruro potásico experimentó el mayor aumento. Al analizar la evolución mensual de los precios internos entre 2020 y 2022, se observan incrementos sustanciales hasta mayo de 2022, tras lo cual estos precios comienzan a estabilizarse con incrementos inferiores al 36% hasta diciembre.

El conflicto en Ucrania y las consecuentes sanciones a Rusia han tenido un impacto significativo en la disponibilidad y el costo de los fertilizantes y los precios de los alimentos en México y Ecuador.

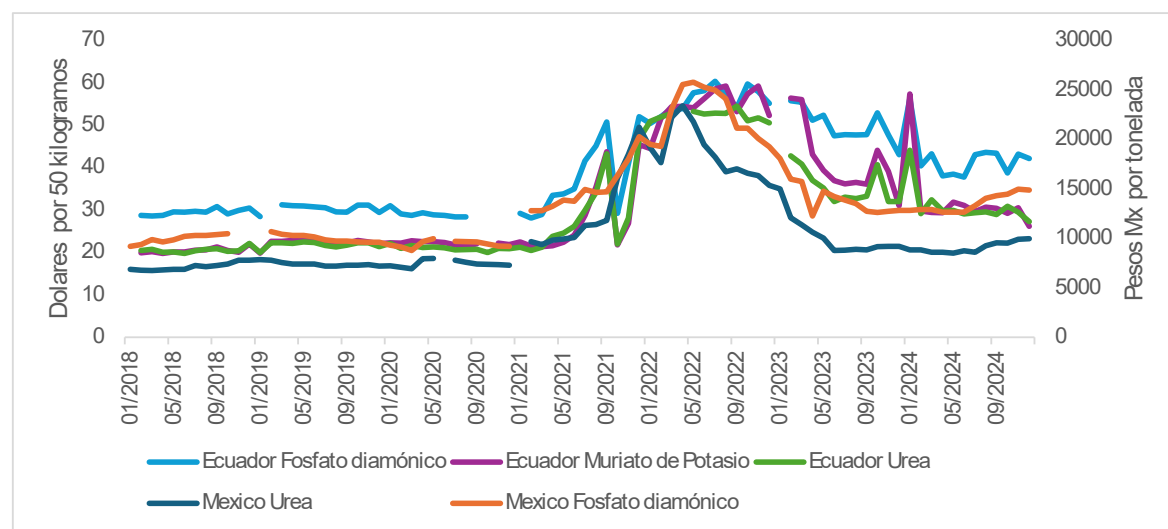
Tabla 2. Variación porcentual de los precios de los fertilizantes 2020-2022 en México y Ecuador

País	México			Ecuador		
Anual	Nitrato de amonio	Urea	Sulfato de amonio	Fosfato diamónico	Cloruro potásico	Urea
2020-2022 cambio en %	42%	161%	153%	123%	175%	131%
2021-2022 cambio en %	36%	-10%	-16%	19%	16%	-2%
Variación intermensual 2021/2022						
Enero	2%	187%	194%	91%	150%	145%
Febrero	-1%	157%	124%	82%	142%	131%
Marzo	-4%	152%	122%	82%	154%	140%
Abril	5%	170%	142%	68%	151%	141%
Mayo	18%	131%	112%	67%	149%	121%
Junio	36%	110%	96%	51%	106%	82%
Julio	42%	71%	70%	44%	95%	66%
Agosto	36%	60%	53%	44%	87%	58%
Septiembre	36%	61%	59%	49%	96%	58%
Octubre	37%	42%	10%	40%	54%	36%
Noviembre	29%	20%	-1%	26%	28%	13%
Diciembre	36%	-10%	-16%	19%	16%	-2%

Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ecuador, y el Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados, México.

En 2023 y 2024, los precios nacionales de los fertilizantes disminuyeron debido a la mayor oferta mundial, a los cambios en la estructura de la demanda y, en el caso de México, al fortalecimiento del peso frente al dólar. Esto último permitió a México ampliar su poder adquisitivo y aumentar las importaciones, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Evolución de los precios internos de los fertilizantes en México y Ecuador, 2018-2024



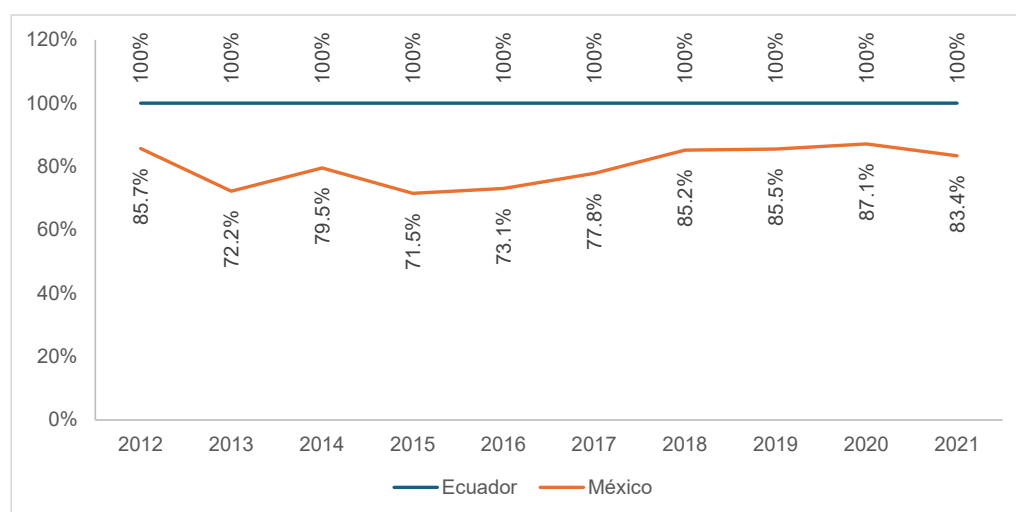
Fuente: Elaboración propia con datos del Sistema de Información Pública Agropecuaria, Ecuador, y el Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados, México.

Dependencia de las importaciones de fertilizantes en México y Ecuador

En ambos países se muestra una elevada dependencia de las importaciones de fertilizantes sintéticos. En México, el nivel medio de dependencia de las importaciones de fertilizantes sintéticos fue del 80,1% (Figura 3). Rusia ha sido un importante proveedor de fertilizantes para México, con una participación que osciló entre el 20 y el 30% en las importaciones totales. Del mismo modo, Ecuador ha sido totalmente dependiente de las importaciones de fertilizantes. Rusia también ha sido un proveedor vital de fertilizantes para Ecuador, ya que entre el 30 y el 50% de las importaciones totales de fertilizantes han procedido de ese país.

La gran dependencia de las importaciones de fertilizantes, especialmente de Rusia, ha hecho que México y Ecuador sean extremadamente vulnerables a las interrupciones en el suministro mundial de fertilizantes y, por ende, a la volatilidad de los precios. Entre 2012 y 2021, las importaciones de Ecuador fueron del 100%. En contraste, México presentó una evolución más dinámica. En 2013, las importaciones cayeron un 15.74% respecto al año anterior, pero a partir de 2014 comenzaron a recuperarse, con aumentos destacados del 10.1% en 2014 y del 9.50% en 2018. Aunque en 2015 se registró otra caída del 10.06%, la tendencia general fue de recuperación hasta alcanzar su punto máximo en 2020 con un 87.1%. Sin embargo, en 2021 se observó un leve retroceso del 4.25%. En general, México experimentó una recuperación sostenida de sus importaciones tras caídas iniciales (Figura 3).

Figura 3. Evolución de la dependencia de fertilizantes de México y Ecuador (2012-2021)



Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, 2024.

Nota: Incluye fertilizantes de nitrógeno, potasio y fosforo.

Entre 2016 y 2023, las principales importaciones de fertilizantes nitrogenados de Ecuador provinieron de Rusia, China, Trinidad y Tobago, Estados Unidos y Argelia, contribuyendo en conjunto con una media del 75% al total de importaciones.

Antes del conflicto entre Ucrania y Rusia, este último representaba el 20.3% de las importaciones de México. En 2022 y 2023, hubo una reconfiguración de los proveedores de fertilizantes nitrogenados, aumentando su participación Estados Unidos, China y Argelia, mientras que la de Rusia y Trinidad y Tobago disminuyó. Rusia y China fueron los dos principales proveedores de Ecuador, con un pro-

medio del 86% entre 2016 y 2021. Debido a las restricciones de Rusia en 2022, su participación cayó al 77.3%, mientras que Estados Unidos e Italia la aumentaron en un 12% y 4%, respectivamente. Sin embargo, en 2023, Rusia y China recuperaron su contribución en el mercado, alcanzando el 86.3% de las importaciones de fertilizantes nitrogenados. Es de destacarse que México cuenta con mayor número de proveedores sobre las importaciones, lo que atenúa su vulnerabilidad en comparación con Ecuador. En consecuencia, México tiene una mayor resiliencia frente a posibles interrupciones en las importaciones desde Rusia principalmente en el grupo de fertilizantes nitrogenados (Tabla 3).

Tabla 3. Porcentaje de distribución de importaciones de fertilizantes nitrogenados por país para México y Ecuador, 2016-2023

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México								
Rusia	28.8%	23.1%	38.2%	29.3%	0.0%	20.3%	22.3%	19.9%
Trinidad y Tobago	0.0%	11.2%	23.9%	30.4%	26.8%	20.9%	15.5%	10.5%
China	32.1%	21.0%	11.6%	13.8%	17.0%	18.8%	8.4%	22.4%
Estados Unidos	11.6%	15.2%	0.0%	0.0%	22.9%	11.6%	20.4%	19.5%
Argelia	4.1%	2.5%	5.1%	8.4%	5.1%	4.5%	3.2%	8.3%
Resto del mundo	23.4%	26.9%	21.2%	18.1%	28.2%	23.8%	30.1%	19.4%
Ecuador								
Rusia	54.8%	53.5%	65.8%	58.6%	54.8%	55.6%	49.0%	56.2%
China	34.9%	34.6%	26.6%	25.4%	29.4%	33.4%	28.3%	30.1%
Estonia	2.1%	2.6%	4.3%	8.8%	5.0%	3.3%	1.3%	4.1%
Estados Unidos	0.7%	0.4%	0.1%	0.3%	0.2%	0.1%	12.1%	1.8%
Italia	0.2%	0.3%	0.2%	0.2%	0.2%	2.9%	4.7%	1.3%
Resto del mundo	7.3%	8.6%	3.1%	6.6%	10.3%	4.7%	4.6%	6.4%

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Nota: Incluye el grupo 1 de la Tabla 1.

En 2021, Rusia y Bielorrusia representaron el 30% del flujo de importación de fertilizantes potásicos en México, mientras que en Ecuador las importaciones alcanzaron el 34.9% (Tabla 4). Sin embargo, en 2022, Ecuador redujo sus importaciones desde estos países. En el primer semestre de 2022, Ecuador importó un total de 34,262 toneladas de fertilizantes potásicos desde Chile, lo que representó un incremento del 1,042% en comparación con el período de enero a junio de 2021. Este cambio tuvo como objetivo establecer una estrategia en respuesta a las restricciones de importación desde Rusia. Las importaciones de Ecuador de fertilizantes potásicos se cambiaron a mercados más cercanos como Chile y Estados Unidos (Tabla 4).

Tabla 4. Porcentaje de distribución de importaciones de fertilizantes potásicos por país para México y Ecuador, 2016-2023

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México								
Rusia	0.0%	55.9%	66.7%	0.0%	22.5%	19.6%	21.5%	39.5%
Canadá	53.7%	33.4%	0.0%	30.6%	28.9%	13.4%	9.4%	21.1%
Estados Unidos	34.3%	6.2%	10.3%	22.6%	16.3%	20.0%	19.7%	10.0%
China	1.1%	0.3%	16.9%	13.9%	15.5%	18.3%	6.9%	11.7%
Bielorrusia	1.4%	0.0%	0.0%	21.2%	0.0%	11.1%	25.3%	0.0%
Resto del mundo	9.5%	4.2%	6.1%	11.7%	16.7%	17.5%	17.2%	17.8%
Ecuador								
Rusia	46.6%	42.9%	43.2%	39.7%	6.0%	20.2%	11.2%	27.7%
Chile	24.6%	19.7%	19.4%	21.8%	26.2%	16.9%	29.8%	22.5%
Canadá	2.3%	7.1%	10.9%	8.3%	17.3%	30.1%	19.3%	14.8%
Bielorrusia	8.2%	10.7%	6.2%	2.6%	18.7%	14.7%	10.8%	10.9%
Resto del mundo	18.3%	19.5%	20.3%	27.6%	31.9%	18.1%	28.9%	24.2%

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Tabla 5. Porcentaje de distribución de importaciones de fertilizantes fosfatados por país para México y Ecuador, 2016-2023

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México								
Estados Unidos	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Ecuador								
Rusia	36.3%	53.4%	65.2%	52.8%	77.5%	85.0%	73.7%	69.5%
Perú	35.2%	42.8%	32.8%	43.5%	17.8%	12.6%	21.9%	25.6%
China	15.9%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	4.2%	2.0%
Resto del mundo	12.6%	3.1%	2.0%	3.7%	4.6%	2.2%	0.2%	2.9%

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Mientras que la dependencia de México de Estados Unidos para los fertilizantes fosfatados representa una vulnerabilidad significativa, Ecuador enfrenta riesgos similares por su alta dependencia de Rusia para los fertilizantes fosfatados y potásicos. Esta dependencia de países específicos para distintos tipos de fertilizantes subraya la importancia de diversificar las fuentes de importación para mitigar la vulnerabilidad ante posibles interrupciones.

Índice de Ventaja Comparativa Revelada e Índice de Intensidad de Importación (III)

El IVCR⁴ fue calculado para determinar la competitividad relativa de los grupos de fertilizantes seleccionados (Tabla 1). También se analizó el Índice de Intensidad de Importación (III)⁵ para determinar la capacidad de importación de los países seleccionados para cada grupo de fertilizantes analizado.

Grupo 1. Fertilizantes nitrogenados

El grupo de fertilizantes nitrogenados mostró valores inferiores a uno al estimar el Índice de Ventaja Comparativa Revelada (IVCR) para México y Ecuador. Esto indica que actualmente ambos países no son competitivos en el comercio global. Sin embargo, es alentador observar que la evolución del indicador aumentó en ambos casos para los años 2022 y 2023, (Tabla 6). Este comportamiento sugiere una posible mejora en su competitividad relativa, lo cual podría traducirse en un mayor potencial exportador en el futuro si se consolidan políticas adecuadas de fortalecimiento productivo y comercial.

⁴ Interpretación del IVCR:

IVCR > 1: Indica que el país tiene una ventaja comparativa revelada en ese producto. Significa que el país exporta una mayor proporción de ese producto que el resto del mundo, lo que sugiere que el país puede producir ese producto de manera más eficiente y/o con costos más bajos, lo que lo hace competitivo en el mercado mundial.

IVCR < 1: Indica que el país no tiene una ventaja comparativa revelada en ese producto. Significa que el país exporta una menor proporción de ese producto que el resto del mundo, lo que podría sugerir que el país no es tan eficiente o competitivo en la producción de ese producto en comparación con otros países.

IVCR = 1: Indica que el país exporta ese producto en la misma proporción que el resto del mundo, por lo que no tiene ni una ventaja ni una desventaja comparativa revelada en ese producto.

⁵ Interpretación del III:

Un III mayor a 1 indica que el país i importa más de lo normal desde el país j, es decir, su comercio bilateral con el país j es más intenso de lo que correspondería según su participación en el comercio mundial.

Un III menor a 1 indica que el país i importa menos de lo normal desde el país j, su comercio bilateral es menos intenso.

Un III cercano a 1 indica que el comercio bilateral es proporcional al comercio mundial, no hay una intensidad especial.

Tabla 6. México y Ecuador: Índice IVCR de fertilizantes nitrogenados

IV CR	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.0031	0.0027	0.0139	0.0001	0.0002	0.0005
Ecuador	0.0014	0.0011	0.0005	0.0014	0.0237	0.0207

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

El Índice de Intensidad de Importación (Índice III) en Ecuador registró valores superiores a 1. Esto indica que la proporción de importaciones de Ecuador en el grupo de fertilizantes nitrogenados para 2021 fue significativamente mayor que la proporción de las importaciones totales. Mientras que en México mostró una intensidad de importación menor a 1, excepto en 2019, cuando observó un incremento de 1.254, debido a una mayor demanda agrícola, combinada con una producción nacional limitada y cambios en los patrones de comercio internacional. Este es un hallazgo significativo, ya que subraya el papel que tienen las importaciones de estos países en el mercado global (Tabla 7).

Tabla 7. México y Ecuador: Índice II de fertilizantes nitrogenados

III	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.434	1.254	0.430	0.232	0.387	0.362
Ecuador	1.679	3.414	1.528	1.552	1.826	2.640

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Grupo 2. Fertilizantes Fosfatados

El IVCR para los fertilizantes fosfatados muestra una ventaja comparativa de las exportaciones de Ecuador sobre las de México en el período de 2018 a 2021. Sin embargo, es importante señalar que se trata de importaciones originadas en Rusia que son reexportadas a Chile, las que representaron un promedio del 85 % de la demanda de Ecuador durante el mismo período. Mientras tanto, para México,

los valores del IVCR fueron inferiores a 1, lo que indica su falta de competitividad para los fertilizantes fosfatados, como se muestra en la Tabla 8. Al analizar el III, ambos países tienen valores inferiores a 1, lo que significa que su participación en el mercado global de importaciones no es significativa en comparación con otros países (Tabla 9).

Tabla 8. México y Ecuador: IVCR de fertilizantes fosfatados

IVCR	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.00498	0.00415	0.00598	0.00543	0.00499	0.00003
Ecuador	1.9015	0.8956	2.7117	3.5394	NA	NA

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Tabla 9. México y Ecuador: Índice de fertilizantes fosfatados II

III	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.00049	0.00158	0.00084	0.00062	0.00480	0.00002
Ecuador	0.18717	0.35122	0.42026	0.46553	NA	NA

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Grupo 3. Fertilizantes potásicos

El IVCR para los fertilizantes potásicos muestra valores inferiores a 1; por lo tanto, no existen ventajas comparativas para este grupo de fertilizantes, como se muestra en la Tabla 10. Sin embargo, al observar el III, se aprecia que Ecuador tiene un nivel más alto de intensidad en las importaciones, excepto en 2020 (Tabla 11).

Tabla 10. México y Ecuador: Índice IVCR de fertilizantes potásicos

IVCR	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.00104	0.00002	0.00231	0.00000	0.00130	0.00001
Ecuador	0.01615	0.00089	0.00108	0.01119	0.00361	NA

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Cuadro 11. México y Ecuador: Índice de fertilizantes potásicos II

III	2018	2019	2020	2021	2022	2023
México	0.2724	0.2685	0.1593	0.0572	0.7089	0.2129
Ecuador	2.1255	4.3783	0.9783	1.0938	NA	NA

Fuente: Elaboración propia con datos de UN Comtrade, 2024.

Los análisis del IVCR y el III ofrecen más información sobre la posición competitiva y las dinámicas de importación de ambos países en los diferentes grupos de fertilizantes. Ni México ni Ecuador muestran ventajas comparativas en el comercio global de fertilizantes nitrogenados, fosfatados o potásicos, como lo indican los valores del IVCR inferiores a 1. Sin embargo, los valores del III revelan el papel significativo de Ecuador en el mercado global de importaciones de fertilizantes nitrogenados, a pesar de carecer de una ventaja comparativa. Además, Ecuador demuestra una mayor intensidad en las importaciones de fertilizantes potásicos que México, lo que sugiere una vulnerabilidad respecto a eventuales interrupciones de la cadena de suministro.

Respuestas de políticas públicas de México y Ecuador

En las secciones anteriores, se ha evidenciado la alta dependencia de Ecuador y México respecto a los fertilizantes, así como su falta de ventaja comparativa. A continuación, se presentan las principales respuestas de política adoptadas por los gobiernos de ambos países ante la crisis internacional del suministro y los precios de los fertilizantes.

El gobierno mexicano ha implementado diversas políticas y programas para hacer frente a la crisis internacional de fertilizantes. De manera sobresaliente, el gobierno ha adoptado tres estrategias que buscan directamente reducir la dependencia del país de las importaciones de fertilizantes sintéticos. Primero, se busca aumentar las inversiones en la producción nacional de fertilizantes sintéticos. Actualmente, México produce solo el 1.5% de los fertilizantes a nivel mundial, dependiendo en gran medida de las importaciones (FIRCO, 2022). Por ejemplo, en 2022, el gobierno mexicano destinó 500 millones de dólares para impulsar la producción de fertilizantes y, entre 2023 y 2024, se inició la construcción de una planta de amoníaco y otra de urea en Poza Rica, Veracruz, las cuales actualmente se encuentran en desarrollo (La Jornada, 2022).

En segundo lugar, el gobierno busca diversificar los proveedores de fertilizantes sintéticos importados, reduciendo la participación de Rusia, que representó el 27% de las importaciones en 2021. Durante 2022, México amplió sus importaciones desde China, Estados Unidos y Canadá. Sin embargo, para 2023, la participación de Rusia en las importaciones de fertilizantes volvió a los niveles de 2021. En tercer lugar, una medida a mediano y largo plazos es promover la autosuficiencia alimentaria mediante el impulso de la agroecología basada en abonos orgánicos, para lo cual se ha implementado un ambicioso proceso de capacitación en esta línea (SADER, 2021).

Además, el gobierno mexicano ha adoptado medidas que contribuyen indirectamente a reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos importados. El programa Fertilizantes para el Bienestar busca entregar fertilizantes a productores de cultivos prioritarios, como maíz y frijol, para impulsar la producción de alimentos. Desde 2019, el programa ha beneficiado a más de 823,000 productores, de los cuales el 41% son mujeres (SADER, 2022). Asimismo, el gobierno ha proporcionado subsidios y apoyos a los productores agrícolas para mitigar el impacto del aumento en los precios de los fertilizantes, que subieron en promedio un 126% en 2022.

Por su parte, el gobierno ecuatoriano ha adoptado dos medidas directas para reducir su dependencia de fertilizantes sintéticos importados. Primero, el gobierno está fomentando la inversión público-privada y proporcionando incentivos adecuados para diversificar las fuentes de consumo y comercio de fertilizantes sintéticos (El Universo, 2023). Segundo, se han dirigido esfuerzos hacia la promoción de la producción local de biofertilizantes (Bullor *et al.*, 2023; Cáceres-Acosta *et al.*, 2024).

Cabe destacar que, en Ecuador, la respuesta a la crisis ha estado marcada por esfuerzos colaborativos entre diversos sectores. Las iniciativas de organizaciones no gubernamentales e internacionales, en particular, han desempeñado un papel importante. Por ejemplo, un esfuerzo conjunto entre el Ministerio de Agricultura y Ganadería, la Alianza de Bioversity International, el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y la Fundación Ecociencia, ha dado lugar a la creación del “Mapa Digital de Fertilidad Química de los Suelos del Ecuador Continental.” Esta herramienta innovadora busca abordar estrategias de fertilización específicas por sitio, destacando el potencial de soluciones novedosas ante la crisis (Martin Lopez *et al.*, 2023).

DISCUSIÓN

Los resultados aportan claridad sobre las complejas interdependencias entre los mercados y el comercio internacional de fertilizantes y los factores geopolíticos, respecto al abasto de México y Ecuador. La guerra en Ucrania y las sanciones impuestas a Rusia han afectado profundamente la disponibilidad y el costo de los fertilizantes a nivel mundial, con incrementos sustanciales en los precios internos de fertilizantes de ambos países. Por ello, la vulnerabilidad de México y Ecuador ante los choques externos, en particular de proveedores como Rusia, que resulta clave para ambas naciones.

Rusia ha desempeñado históricamente un papel fundamental como proveedor de fertilizantes de ambos países. Pero han emergido diferencias notables en sus estrategias de importación: mientras México se beneficia de una base de proveedores más diversificada, la excesiva dependencia de Ecuador de unos pocos proveedores clave lo expone a una mayor vulnerabilidad. De acuerdo con Balassa (1965), la ventaja comparativa revelada se mide mediante flujos comerciales que reflejan los costos relativos y otros factores de producción. La aplicación del IVCR ha permitido detectar desigualdades en la dotación y uso de factores productivos, así como evaluar las políticas públicas y estructuras de mercado (Heredia & Huarachi, 2009; Infante Jiménez & López Villaseñor, 2019). En este sentido, la ausencia de una VCR significativa en el sector de los fertilizantes para México y Ecuador confirma su posición desventajosa en los mercados internacionales.

El IVCR indica que ni México ni Ecuador presentan ventajas comparativas en el comercio global de fertilizantes. Además, el III revela que la presencia de ambos países en el mercado global no es significativa en comparación con otras naciones, lo que pone de relieve la necesidad de intervenciones estratégicas para mejorar su competitividad y reducir su dependencia de unos pocos proveedores clave.

La estrategia de Ecuador de trasladar sus importaciones de fertilizantes potásicos de Rusia y Bielorrusia hacia mercados más cercanos, como Chile y Estados Unidos, ejemplifica una respuesta adaptativa ante los cambios geopolíticos. La diversificación de fuentes de importación puede ayudar a mitigar los riesgos asociados con las tensiones geopolíticas y las interrupciones en las cadenas de suministro. El análisis de estos hallazgos subraya la importancia de la diversificación, la planificación estratégica y las políticas públicas para fortalecer la resiliencia y la competitividad ante los choques externos en el mercado de fertilizantes, tanto para México como para Ecuador.

Lo anterior es coherente con los hallazgos de Zhang *et al.* (2023), que destacan la necesidad de desarrollar investigaciones sobre estrategias de diversificación y descentralización para el acceso a alimentos e insumos, a fin de guiar políticas estables de suministro alimentario. Este escenario también refleja la necesidad de considerar que, aunque el IVCR ayuda a identificar la especialización de un país en un sector determinado (Quintero-Ramírez *et al.*, 2020), puede estar sesgado por factores como el tamaño del mercado o políticas internas (Yeats, 1985; Van Rensselaer, 2022). Aun así, su uso permite a los países tomar decisiones estratégicas orientadas a reducir su dependencia y fortalecer sus capaci-

dades internas (Lectard & Rougier, 2018). En consecuencia, las respuestas de política de México y Ecuador reflejan su compromiso de mitigar los impactos de la crisis de precios de los fertilizantes sobre los agricultores e, indirectamente, de garantizar la seguridad alimentaria. Se han desplegado medidas proactivas para mitigar el impacto del aumento de precios y la dependencia de las importaciones; en México, con el programa Fertilizantes para el Bienestar que, si bien, beneficia a un número limitado de productores, su sostenibilidad depende en gran medida de la disponibilidad y accesibilidad de fertilizantes en el mercado global.

Este tipo de intervenciones se alinea con los hallazgos de Costinot *et al.* (2015), quienes subrayan que la VCR puede ser útil para analizar las ventajas y desventajas a lo largo del tiempo y evaluar su impacto en las políticas locales y comerciales. Sin embargo, la limitada capacidad de producción nacional de México sigue siendo un obstáculo importante para alcanzar la autosuficiencia en el suministro de fertilizantes. Como parte de su estrategia a largo plazo, México está promoviendo la adopción de fertilizantes orgánicos para reducir la dependencia de los sintéticos y avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles, aunque los productores nacionales siguen expuestos a una competencia creciente entre empresas globales (Alvarado & Castillo, 1996; Euan-Ávila *et al.*, 2006). Esto debilitó la capacidad nacional para sostener una oferta competitiva ante la caída de los precios internacionales después de 1997.

Reconociendo la dependencia de las importaciones, el gobierno mexicano ha iniciado esfuerzos para aumentar la producción nacional de fertilizantes y diversificar a los proveedores. Al respecto, Abay *et al.* (2023) señalan que, debido a la guerra entre Rusia y Ucrania, los recientes aumentos en los precios de los fertilizantes inorgánicos están reforzando los llamados a desplegar políticas públicas con opciones de corto y largo plazos respecto al aprovechamiento de fertilizantes, incluidos los orgánicos, con el fin de asegurar prácticas sostenibles de intensificación agrícola y reducir la exposición de los pequeños productores a los mercados globales volátiles.

Sin embargo, la limitada capacidad de producción nacional de México sigue siendo un obstáculo importante para alcanzar la autosuficiencia en el suministro de fertilizantes. Como parte de su estrategia a largo plazo, México promueve la adopción de fertilizantes orgánicos para avanzar hacia prácticas agrícolas más sostenibles. El éxito de este enfoque depende de factores como la escalabilidad, la accesibilidad y la aceptación por parte de los agricultores, aspectos que ya se están abordando para facilitar su adopción generalizada. A largo plazo, los esfuerzos deberían centrarse tanto en diversificar las fuentes de suministro de fertilizantes, como en potenciar la producción interna, su uso eficiente según el tipo de suelo e impulsando la agricultura regenerativa, entre otros.

De manera similar, la respuesta de Ecuador se enfoca en mantener un comercio de fertilizantes abierto y fluido para asegurar un suministro adecuado y la estabilidad de precios. El fomento de la inversión público-privada y la diversificación de las fuentes de fertilizantes buscan reducir la dependencia de un número limitado de proveedores, y aumentar la resiliencia ante las fluctuaciones del mercado. Ecuador históricamente ha sido un importador de fertilizantes y su economía agrícola depende de cul-

tivos de exportación como el banano y el cacao, lo que incrementa su sensibilidad a las fluctuaciones de precios internacionales (Llieve *et al.*, 2015; Jácome *et al.*, 2009). En general, las respuestas de México y Ecuador reflejan enfoques distintos frente a la dependencia de fertilizantes, combinando intervenciones a corto plazo con estrategias a largo plazo, aunque insuficientes para impulsar la diversificación y la sostenibilidad del sector agrícola.

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio confirman que el conflicto en Ucrania y las sanciones impuestas a Rusia tuvieron un impacto significativo en la disponibilidad y el costo de los fertilizantes en el mercado internacional y, en particular, en países como México y Ecuador, evidenciando la alta vulnerabilidad de ambos países ante las interrupciones en las cadenas globales de suministro en los últimos años.

El IVCR, junto con el análisis de dependencia de importaciones, permitió documentar la marcada dependencia de fertilizantes importados en ambos países: México con un nivel promedio de 80.1% y Ecuador con una dependencia total. La alta participación de Rusia como proveedor clave acentúa esta vulnerabilidad, especialmente en contextos de crisis geopolítica como el actual.

Las respuestas de política pública implementadas han buscado mitigar los efectos del alza de precios sobre los costos de producción e inflación alimentaria. Sin embargo, las evidencias sugieren que estas medidas serán insuficientes si no se complementan con estrategias estructurales. Es necesario diseñar e instrumentar políticas agrícolas y comerciales que reduzcan la exposición a choques internacionales, con énfasis en garantizar un suministro estable y asequible de fertilizantes para sectores sociales y cultivos estratégicos. A largo plazo, resulta prioritario disminuir la dependencia externa mediante la diversificación de socios comerciales y la inversión en alternativas sostenibles, como la agricultura regenerativa, y el uso racional de insumos según cada tipo de ecosistema.

La investigación agrícola deberá desempeñar un rol central en el desarrollo de tecnologías que reduzcan el uso de fertilizantes sintéticos, aumenten la eficiencia nutricional de los cultivos y mejoren la resiliencia productiva. Para ello, se requerirán inversiones sustanciales en infraestructura, modernización de plantas, mejora logística y desarrollo de capacidades tecnológicas a nivel nacional y regional.

BIBLIOGRAFÍA

- Abay, K. A., Breisinger, C., Glauber, J., Kurdi, S., Laborde, D., & Siddig, K. (2023). The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. *Global Food Security*, 36, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2023.100675>
- Alvarado, S., & Castillo, E. (1996). *La comercialización de fertilizantes en México*. Conferencia Regional para Latinoamérica y el Caribe, IFAPPI, México, D.F.
- Balassa, B. (1965). *Trade liberalization and 'revealed' comparative advantage*. Manchester School of Economic and Social Studies, 33, 99–123.
- Banco Central del Ecuador (BCE). (2024). *Evolución de la Balanza Comercial por Productos. Enero – Agosto 2024*. <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/SectorExterno/BalanzaPagos/balanzaComercial/ebc202410.pdf>
- Belhadi, A., Kamble, S., Subramanian, N., Singh, R. K., & Venkatesh, M. (2024). *Digital capabilities to manage agri-food supply chain uncertainties and build supply chain resilience during compounding geopolitical disruptions*. International Journal of Operations & Production Management. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-11-2022-0737>
- Bullor, L., Braude, H., Monzón, J., Cotes Prado, A. M., Casavola, V., Carbajal Morón, N. & Rispoulous, J. (2023). Bioinsumos: Oportunidades de inversión en América Latina - *Direcciones de inversión No. 9*. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9060es>
- Cáceres-Acosta, E. A., Aguirre-Flores, A. A., Castro-Brindis, R., Almaraz-Suárez, J. J., Colinas-León, M. T., Juárez-Hernández, M. de J. & Montes-Colmenares, R. O. (2024). Efecto de biofertilizantes en el recuento de rizobios e indicadores morfológicos del frijol ejotero (*Phaseolus vulgaris* L.) en Ecuador. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences – ex Agro-Ciencia*, 40(1), 66–80. ISSN 0719-3890.
- Calmon, R. L., Droguett, R., Da Silva, A., De Moura, M., Joaquim, G. & Do Espírito, M. (2020). Especialización y competitividad: análisis de las exportaciones brasileñas de cacao en grano y productos. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1207-1219. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2348>
- Cerda, A., Alvarado, M., García, L., & Aguirre, M. (2008). Determinantes de la competitividad de las exportaciones de vino chileno. *Panorama Socioeconómico*, 26(37), 172-181.
- Contreras-Castillo, J. M., & Leos-Rodríguez, J. A. (2021). Nota metodológica sobre el índice de ventaja comparativa revelada normalizada. *Metodologías y herramientas para la investigación*, 9, Universidad Autónoma Chapingo.
- Chen, Y., Li, M., & Abu Hatab, A. (2020). A spatiotemporal analysis of comparative advantage in tea production in China. *Agricultural Economics (Zemědělská ekonomika)*, 66(12), 550-61.
- Delgado, G. (2020). *Análisis de la competitividad del comercio agrícola en las Américas: Comercio internacional e integración regional*. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/8636>

- Dimkpa, C., Adzawla, W., Pandey, R., Atakora, W. K., Kouame, A. K., Jemo, M., & Bindraban, P. S. (2023). Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: An overview of soil health implications. *Frontiers in Soil Science*, 3.
- El Universo. (2023). *La construcción de una planta para fertilizantes y veinte proyectos más están pactados para invertir en Ecuador*. <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/la-construccion-de-una-planta-para-fertilizantes-y-veinte-proyectos-mas-estan-pactados-para-invertir-en-ecuador-nota/>
- Euan-Avila, J. I., Chavez, M., & Whiteford, S. (2006). The North American Free Trade Agreement (NAFTA) and the Mayan Indigenous People of the Yucatan. *Michigan State Journal of International Law*, 14, 291.
- FAO. (2023). *FAOSTAT: Fertilizers by Nutrient*. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RFN>
- FIRCO. (2022). *Conflicto Rusia-Ucrania agrava crisis de los fertilizantes en México*. <https://www.gob.mx/firco/prensa/conflicto-rusia-ucrania-agrava-crisis-de-los-fertilizantes-en-mexico?idiom=es>
- Hebebrand, C., & Glauber, J. W. (2023). *The Russia-Ukraine war after a year: Impacts on fertilizer production, prices, and trade flows*.
- Hebebrand, C., & Laborde Debucquet, D. (2023). *High fertilizer prices contribute to rising global food security concerns*. https://doi.org/10.2499/9780896294394_07
- Hernandez, M. A., & Torero, M. (2013). Market concentration and pricing behavior in the fertilizer industry: A global approach. *Agricultural Economics*, 44(6), 723-734.
- IICA. (2023, febrero 3). *Aumenta 137 % el valor de las importaciones de fertilizantes químicos en América Latina y el Caribe en 2022*. Blog del IICA. <https://blog.iica.int/blog/aumenta-137-valor-las-importaciones-fertilizantes-quimicos-america-latina-caribe-en-2022>
- Ilinova, A., Dmitrieva, D., & Kraslawski, A. (2021). Influence of COVID-19 pandemic on fertilizer companies: The role of competitive advantages. *Resources Policy*, 71, 102019. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102019>
- Infante Jiménez, Z. T., & López Villaseñor, A. J. (2019). El trinomio de ventajas comparativas reveladas en la canasta básica de la Sader en América del Norte. *The Anáhuac Journal*, 19(2), 39-69.
- Jones, K., & Nti, F. (2022). Impacts and repercussions of price increases on the global fertilizer market. *USDA Foreign Agricultural Service*.
- La Jornada. (2022, 17 de julio). Invertirá el gobierno 500 mdd en aumentar la producción de fertilizantes. La Redacción. <https://www.jornada.com.mx/notas/2022/07/17/politica/invertira-el-gobierno-500-mdd-en-aumentar-la-produccion-de-fertilizantes/>
- Lara Haro, D. M., Argothy Almeida, L. A., Martínez Mesías, J. P., & Mejía Chávez, M. A. (2022). El impacto de las crisis en el desempeño del sector agropecuario del Ecuador. *Revista Finanzas y Política Económica*, 14(1), 167-186. <https://doi.org/10.14718/revfinanzpolitecon.v14.n1.2022.7>

- Lectard, P., & Rougier, E. (2018). Can developing countries gain from defying comparative advantage? *World Development*, 102, 90-110.
- Lema, D., Gallacher, M., Bustamante, T., Muñoz, G., Paolo, S. C., Ardilla, S., & Rondinone, G. (2022). *Políticas agrícolas en México: una visión agregada y un análisis de programas clave*. BID.
- Llive, F., Cadillo Benalcázar, J. J., Liger, B., Rosero Asqui, G., Fraga Ramos, E., & Ramos Martín, J. (2015). *Vulnerabilidad y dependencia internacional de fertilizantes en el Ecuador*.
- Ministerio de Producción, Comercio Exterior, Inversiones y Pesca (MPCEIP). (2024). *Boletín de Cifras: Comercio Exterior octubre 2024*, Año 8, Décima Edición. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2024/10/Boletin-Comercio-Exterior-OCTUBRE-2024.pdf>
- OECD. (2023). *Agricultural Policy Monitoring and Evaluation 2023: Adapting Agriculture to Climate Change*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/b14de474-en>
- Pérez Cárdenas, J. C., et al. (2004). *Zona productora de mora con ventajas competitivas en el eje cafetero de Colombia*.
- Quintero-Ramírez, J. M., Omaña-Silvestre, J. M., & Ramírez-Padrón, L. C. (2020). Análisis de indicadores de ventajas comparativas reveladas: competitividad de las exportaciones de fresa mexicana. *Revista de Desarrollo Económico*, 7(24), 13-19.
- SADER. (2021). *Prácticas agrícolas sustentables aumentan el rendimiento del maíz, revelan investigaciones mexicanas*. <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/practicas-agricolassustentables-aumentan-el-rendimiento-del-maiz-revelan-investigaciones-mexicanas>
- SADER. (2022). *Programa de Fertilizantes para el Bienestar*. <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/programa-de-fertilizantes-para-elbienestar-2024>
- UN Comtrade. (2024). *[Base de datos en línea]*. <https://comtradeplus.un.org/>
- Van Rensselaer, K. (2022). *Protection for the Neediest? Comparative Advantage, Tariffs, and Political Economy Dynamics under NAFTA*. *The International Trade Journal*, 36(3), 200–218.
- WFP. (2022). *WFP Ecuador Country Brief December 2022*. <https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000146331/download/>
- World Bank Group. (2022). *Commodity Markets Outlook: Pandemic, war, recession*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/38160>
- Yeats, A. J. (1985). *On the appropriate interpretation of the revealed comparative advantage index*. *Weltwirtschaftliches Archiv*, 121(1), 61–73.
- Zhang, D., & Sun, Z. (2022). Comparative advantage of agricultural trade in countries along the belt and road and China and its dynamic evolution characteristics. *Foods*, 11(21), 3401. <https://doi.org/10.3390/foods11213401>
- Zhang, Z., Abdullah, M. J., Xu, G., Matsubae, K., & Zeng, X. (2023). Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency perspective. *Scientific Reports*, 13(1), 16591. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-43883-4>

Uso de la inmunoinformática en el diseño de vacunas basadas en epítomos

José de Jesús Lira Ricárdez¹, Lucía Ortega Cabello¹,
Yolanda Margarita Sánchez Castilleja², Jorge Joel Reyes Méndez³

Resumen. Los epítomos, subunidades de un antígeno, son cruciales en la respuesta inmunitaria adaptativa. Interactúan con los receptores de los linfocitos T colaboradores (Th), citotóxicos (Tc) y B, desencadenando la producción de citocinas y anticuerpos. Para asegurar una respuesta eficaz, ya sea postinfecciosa o postvacunal, los epítomos deben cumplir ciertas propiedades como antigenicidad, inmunogenicidad, alergenicidad y otras características fisicoquímicas. Actualmente, el desarrollo de vacunas más eficaces se apoya en herramientas inmunoinformáticas que permiten la predicción de epítomos con las propiedades deseadas. Con el fin de presentar a los profesionales de la salud humana y animal las herramientas inmunoinformáticas para la creación de vacunas basadas en epítomos, esta revisión explora su aplicación en el diseño de vacunas contra enfermedades en ambos ámbitos. La información se obtuvo mediante una búsqueda booleana en Google Académico, Scopus, Scirus y la biblioteca digital de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (BidiUAM).

Palabras clave: Vacunas, Epítomos, Inmunoinformática, MHC, Linfocitos.

¹ Departamento de Sistemas Biológicos, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Ciudad de México. Correo electrónico: jlira@correo.xoc.uam.mx

² Departamento de Producción Agrícola y Animal. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Ciudad de México.

³ Departamento de Atención a la Salud. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, Ciudad de México.

Abstract. *Epitopes, subunits of an antigen, are crucial in the adaptive immune response. They interact with receptors on B, helper T (hT), and cytotoxic T (cT) lymphocytes, triggering the production of cytokines and antibodies. To ensure an effective response, whether post-infectious or post-vaccination, epitopes must meet specific criteria of antigenicity, immunogenicity, allergenicity, and other physicochemical characteristics. Currently, the development of more effective vaccines relies on immunoinformatics tools that allow the prediction of epitopes with the desired properties. This review aims to introduce human and animal health professionals to immunoinformatics tools used in the creation of epitope-based vaccines. It explores their application in designing vaccines for both human and animal diseases. The data was compiled through a comprehensive boolean search of Google Scholar, Scopus, Scirus, and the Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco's digital library (BidiUAM).*

Keywords: *Vaccines, Epitopes, Immunoinformatics, MHC, Lymphocytes.*

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de vacunas es fundamental para la prevención y control de enfermedades infecciosas, protegiendo la salud pública tanto en humanos como en animales. Ejemplos notables incluyen las vacunas contra la influenza o gripe aviar (H5N1), parvovirus (parvovirus), así como las producidas contra brucelosis (*Brucella* spp) y leptospirosis (*Leptospira* spp) en animales; en humanos se dispone, entre otras, de vacunas contra la viruela (*variola*), difteria (*Corynebacterium diphtheriae*), tétanos (*Clostridium tetani*), poliomielitis (poliovirus) y, más recientemente, COVID-19 (SARS-CoV-2). Desde la variolización del siglo XVIII hasta el desarrollo de metodologías clásicas —como la inactivación fisicoquímica del patógeno o la purificación de antígenos—, el proceso de creación de vacunas ha evolucionado significativamente. Aunque tradicionalmente estos métodos podían tardar hasta 15 años (Brisse *et al.*, 2020), han generado un amplio catálogo de vacunas bacterianas y virales que han contribuido a la prevención, control y erradicación de enfermedades (Mascola & Fauci, 2019).

Sin embargo, la aparición de nuevas enfermedades infecciosas, la reemergencia de patógenos conocidos, la resistencia a antibióticos, la ineficacia de algunas vacunas existentes y el incremento de la población humana que facilita la propagación de enfermedades (Oli *et al.*, 2020), han impulsado a los investigadores a buscar estrategias innovadoras. La integración de la tecnología del ADN recombinante, la proteómica y, crucialmente, las herramientas bioinformáticas han revolucionado la investigación, selección y evaluación de posibles epítomos para el desarrollo de vacunas.

Este avance representa un reto significativo para la investigación clínica y la industria farmacéutica, con el objetivo de prevenir futuras epidemias y pandemias de manera efectiva y segura, minimizando las reacciones adversas.

El presente trabajo abordará brevemente el desarrollo y funcionamiento de las vacunas, para luego profundizar en casos específicos de diseño de vacunas basadas en la selección de epítopos y las perspectivas futuras que ofrecen las diversas herramientas de la bioinformática en este campo.

Generalidades de las vacunas

De acuerdo a la OMS, las vacunas se forman a partir de agentes infecciosos, sus fracciones o toxinas, mismas que, administradas en un individuo, estimulan al sistema inmune celular y humoral, generando memoria inmunológica capaz de reconocer de manera más rápida y eficaz al agente causal en subsecuentes “encuentros” (World Health Organization, 2021). Dicho estímulo, está en dependencia de ciertas propiedades biológicas y características fisicoquímicas que se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades biológicas y características fisicoquímicas que deben cumplir las vacunas

Propiedades biológicas	Características fisicoquímicas
Antigenicidad. Es la capacidad de una vacuna para inducir una respuesta inmune, generando anticuerpos y células de memoria.	Peso molecular. Indica el tamaño de la molécula, es decir, es la suma de los pesos atómicos de todos los aminoácidos que conforman una proteína. Es expresado en kilodaltons.
Afinidad. Indica la fortaleza con la que los anticuerpos se unen a los antígenos de la vacuna.	Punto isoelectrico. Es el pH donde la molécula de la vacuna tiene carga neta cero, influyendo tanto en su solubilidad como en su formulación y estabilidad.
Alergenidad y toxicidad. Reflejan el riesgo de reacciones alérgicas o efectos secundarios graves, respectivamente (Sharma <i>et al.</i> , 2021; Ryan <i>et al.</i> , 2024).	Estabilidad. Se refiere a la capacidad de la vacuna de mantener sus propiedades originales a lo largo del tiempo, bajo ciertas condiciones de almacenamiento y administración (Anupamjeet <i>et al.</i> , 2024; Nahian <i>et al.</i> , 2025).

Seguridad y beneficios de las vacunas

Las vacunas, aunque esenciales para la salud pública, pueden provocar reacciones adversas leves como inflamación, dolor o enrojecimiento en el sitio de inyección, febrícula, dolor de cabeza y muscular.

Estas manifestaciones suelen resolverse espontáneamente en unas 48 horas, sin dejar secuelas. En raras ocasiones, pueden presentarse reacciones de hipersensibilidad inmediata (tipo I) o alergias, comúnmente asociadas a componentes de la vacuna, como los adyuvantes. Estos últimos se incorporan para potenciar la respuesta inmune (celular y/o humoral) a largo plazo, permitiendo el uso de una menor cantidad de antígeno por dosis. Sin embargo, adyuvantes como el hidróxido de aluminio y el fosfato de aluminio han sido vinculados a casos de anafilaxia (una reacción alérgica aguda y sistémica) (Mitkus *et al.*, 2011; Perea-Valle *et al.*, 2022).

Otras reacciones adversas, aunque muy fortuitas, incluyen: abscesos en el sitio de inyección, hipersensibilidad tipo II, convulsiones, parálisis facial y el Síndrome de Guillain-Barré (SGB) (WHO, 2013). El SGB es una afección aguda del sistema nervioso periférico que se ha reportado en algunos pacientes vacunados contra COVID-19 (Arce *et al.*, 2021; Waheed *et al.*, 2021). No obstante, una revisión sistemática reciente de Abuawwad *et al.* (2024), que abarcó 103 estudios y 175 casos, no identificó factores predisponentes y sugiere que la asociación entre la vacuna contra COVID-19 y el SGB podría ser una confusión.

Es indudable que los beneficios de la vacunación superan ampliamente los eventos adversos descritos. Las vacunas brindan una protección individual y colectiva vital, previniendo enfermedades graves y contribuyendo al control o erradicación de otras, tanto en la salud humana como animal.

Las vacunas y el sistema inmune

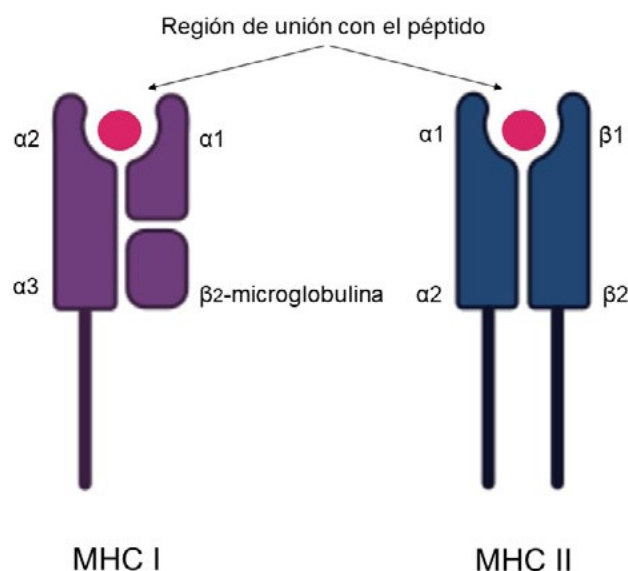
Para que una vacuna sea efectiva, es imprescindible que el sistema inmune reconozca componentes específicos del antígeno, conocidos como epítomos. Estos epítomos establecen uniones clave con las moléculas del Complejo Mayor de Histocompatibilidad (MHC), cuya denominación varía según la especie (por ejemplo, HLA en humanos, DLA en caninos, SLA en cerdos y BoLA en bovinos).

Las moléculas de MHC de clase I se encuentran en la superficie de la mayoría de las células nucleadas. Estructuralmente, se componen de dos cadenas polipeptídicas unidas no covalentemente: una cadena pesada α y una β_2 -microglobulina de menor peso molecular (Figura 1). La cadena α presenta tres dominios extracelulares (α_1 , α_2 y α_3). Los dominios α_1 y α_2 forman un surco donde se ancla covalentemente un epítomo de 8 a 11 aminoácidos. Los extremos de este epítomo se fijan a regiones conservadas del MHC mediante puentes de hidrógeno. La β_2 -microglobulina, interactúa con el correceptor CD8 de los linfocitos T citotóxicos a través de enlaces no covalentes (Figura 2) (Abbas *et al.*, 2023; Tizard, 2024).

Por otro lado, las moléculas de MHC de clase II se expresan de forma constitutiva y principalmente en células presentadoras de antígenos, como las células dendríticas, macrófagos y linfocitos B. Son heterodímeros formados por dos cadenas polipeptídicas asociadas no covalentemente, denominadas α y β (Figura 1). Ambas cadenas poseen una región transmembrana y una cola intracitoplasmática.

Sus dominios extracelulares (α_1 , α_2 , β_1 , β_2) están interconectados por puentes disulfuro. Las regiones α_1 y β_1 forman la hendidura de unión para epítopos de mayor longitud, de 9 a 25 aminoácidos. El asa β_2 establece contacto con el correceptor CD4 de los linfocitos T colaboradores (Figura 3) (Sánchez-Trincado *et al.*, 2017; Racle *et al.*, 2023; Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2023).

Figura 1. Estructura del complejo mayor de histocompatibilidad clase I y clase II



Cabe mencionar, que los epítopos deben ser lineales para presentar una mejor interacción con las hendiduras del MHC, para ser posteriormente presentados a los linfocitos T (Soria-Guerra *et al.*, 2015). En contraste, los epítopos para los linfocitos B pueden basarse en la estructura primaria de los antígenos (continuos, lineales) o su estructura secundaria tridimensional (discontinuos o conformacionales), para favorecer la inducción de la respuesta inmune humoral (Raoufi *et al.*, 2020).

La interacción del epítipo-MHC I con linfocitos T citotóxicos (T_c) a través de sus receptores TCR, CD8 y CD28, estimulan la liberación de perforinas y granzimas. Las primeras, son capaces de provocar poros en la membrana de la célula diana (célula infectada o tumoral), a través de los cuales ingresan las granzimas que ocasionan muerte celular o apoptosis (Figura 2). La presentación del epítipo-MHC II a los linfocitos T colaboradores (T_h), desencadena una serie de reacciones, que incluyen la liberación de interleucinas (IL), tales como IL2, IL4, IL5, IL6, IL7, IL10, IL12, interferón γ ($INF\gamma$) y factor de

necrosis de necrosis tumoral β (FNT β) (Figura 3) capaces de estimular otros tipos celulares, producción de anticuerpos y células de memoria, principal objetivo de cualquier vacuna (Abbas *et al.*, 2023; Tizard, 2024).

Figura 2. Interacción MHC I/epítipo con linfocito T citotóxico

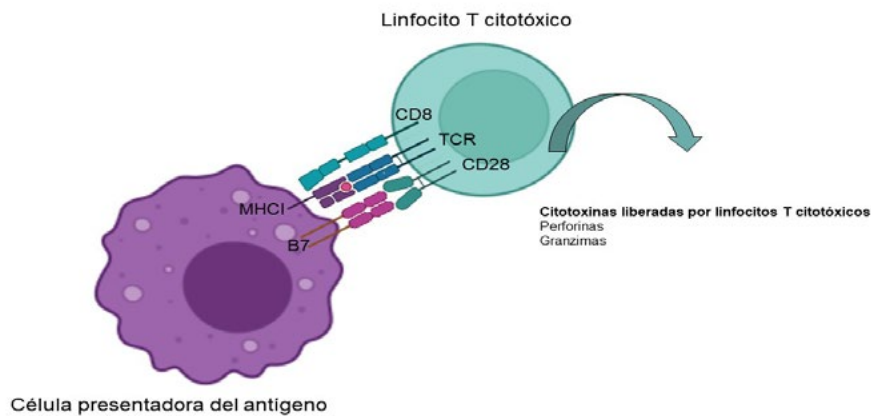
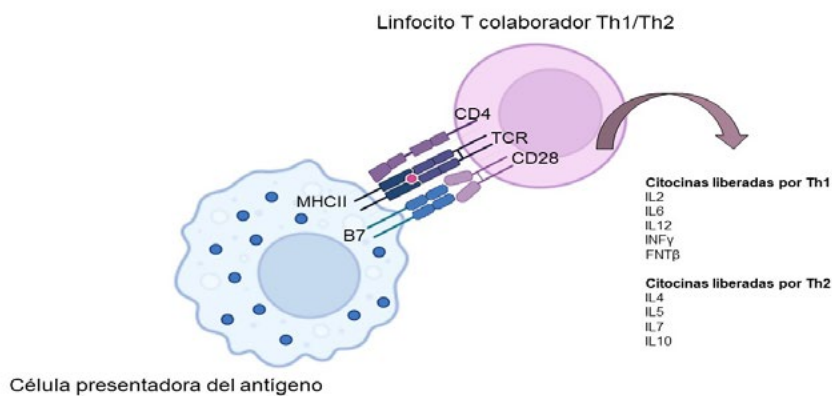


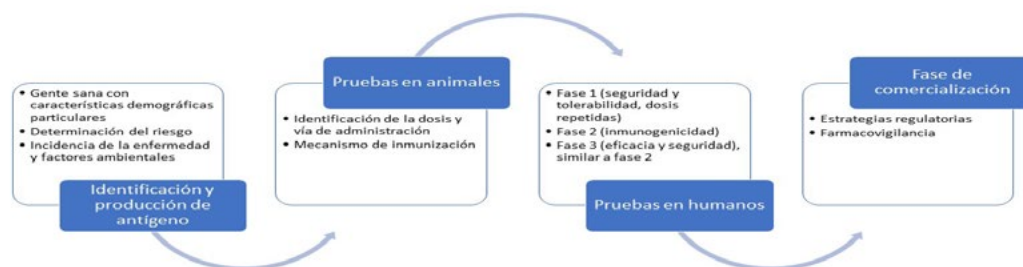
Figura 3. Interacción MHC I/epítipo con linfocito T colaborador



Desarrollo de vacunas e inmunoinformática

El desarrollo tradicional de vacunas es un proceso prolongado, que puede tomar entre 10 y más de 20 años hasta su comercialización y distribución. Esto se debe a las diversas etapas involucradas, que abarcan desde la identificación y producción del antígeno hasta las extensas pruebas en humanos, culminando con la fase de comercialización y farmacovigilancia, un proceso similar al desarrollo de fármacos (Figura 4) (Han, 2015). En contraste, en el ámbito veterinario, este proceso suele ser más rápido. Un ejemplo notable es la vacuna equina contra el flavivirus causante de la fiebre del Nilo Occidental, que obtuvo su licencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en solo un año tras el descubrimiento de la enfermedad en agosto de 1999 (Roth, 2011).

Figura 4. Proceso de desarrollo de vacunas



La reciente pandemia de COVID-19 puso de manifiesto un cambio paradigmático en el desarrollo de vacunas para humanos. Contrario a la línea de tiempo tradicional de 10 a 20 años, las primeras vacunas contra SARS-CoV-2 fueron diseñadas y producidas en aproximadamente un año desde la declaración oficial de pandemia por la OMS en marzo de 2020. Esta notable aceleración fue posible gracias a la integración de estudios *in silico*, que combinan técnicas computacionales y estadísticas con grandes volúmenes de datos biológicos y médicos (Ekins *et al.*, 2007). Dentro de este marco, la inmunoinformática ha emergido como un campo crucial, dando origen a subdisciplinas como la inmunogenómica, la inmunoproteómica, la predicción de epítomos y la vacunación *in silico* (Tomar & De, 2014). Estas herramientas computacionales han transformado significativamente el proceso de diseño y desarrollo de vacunas, reduciendo drásticamente los tiempos de investigación y producción.

Vacunología e inmunoinformática

La inmunoinformática surge como un puente crucial entre la inmunología experimental y los sistemas computacionales, facilitando la comprensión de las interacciones moleculares y la activación de la respuesta inmunológica (Bahrami *et al.*, 2019; Oli *et al.*, 2020). Esta disciplina permite la creación de algoritmos capaces de predecir la unión de epítopos específicos con los linfocitos T y B (Soria-Guerra *et al.*, 2015; Raoufi *et al.*, 2020; de Oliveira *et al.*, 2022; da Silva *et al.*, 2022). Para ello, se emplean diversos métodos estadísticos y matemáticos, incluyendo vectores de soporte, sistemas basados en fragmentos, estudios cuantitativos de relación estructura-actividad, redes neuronales y modelos ocultos de Markov a través de redes neuronales Bayesianas (Fleri *et al.*, 2017; Sunita *et al.*, 2019).

El proceso inmunoinformático para el desarrollo de vacunas comienza con la selección y discriminación de epítopos, considerando sus propiedades biológicas y características fisicoquímicas. Una metodología destacada en este campo es la vacunología reversa (RV por sus siglas en inglés). Esta técnica se basa en el análisis de la secuencia genómica de un microorganismo para identificar y predecir antígenos proteicos que son secretados (secretoma) o expresados en la superficie celular (surfoma), y evaluar su capacidad para inducir una respuesta inmune (Bruno *et al.*, 2015; Parvizpour *et al.*, 2020; Oli y Rowaiye, 2022). Complementada con tecnologías como la transcriptómica y proteómica, la RV ha demostrado ser una estrategia viable para el desarrollo de vacunas contra bacterias que no son susceptibles a los métodos clásicos de inactivación fisicoquímica, como es el caso de la vacuna antimeningocócica Bexsero® (Bidmos *et al.*, 2018).

Una evolución de esta metodología es la vacunología reversa 2.0, que va más allá de la mera identificación de antígenos. Utiliza el genoma microbiano para guiar la expresión, conservación y el diseño estructural de antígenos, optimizando su interacción con anticuerpos. Además, permite aislar y analizar anticuerpos, favoreciendo la expresión de porciones variables de sus cadenas ligeras y pesadas mediante recombinación y el uso de herramientas como Vaxign®, NERVE®, HensBC®, GLIMMER®, ORF-FINDER®, o GS-Finder®, seguidas de su identificación con ProDom®, Pfam®, o PROSITE® (Rappuoli *et al.*, 2016; Bidmos *et al.*, 2018; Sunita *et al.*, 2019; Nemati *et al.*, 2021).

Sin embargo, la vacunología reversa presenta limitaciones en el desarrollo de vacunas virales, especialmente cuando los epítopos, aunque bien definidos en secuencia, exhiben variabilidad estructural o inestabilidad. Para abordar esto, se ha desarrollado la vacunología estructural (SV por sus siglas en inglés). Esta técnica integra la inmunología, biología molecular y bioinformática para la identificación y el desarrollo de antígenos. La SV permite la remodelación del antígeno o epítipo mediante técnicas de ingeniería reversa y la reformulación de la plataforma de la vacuna (vector de transporte o presentación), mejorando su seguridad y eficacia (Anasir & Poh, 2019).

La vacunología estructural ha sido de gran utilidad en el desarrollo de posibles vacunas contra antígenos bacterianos, como la lipoproteína transmembranal β b-OMP de *Leptospira interrogans* y

proteínas recombinantes de *Streptococcus pneumoniae* (Grassmann *et al.*, 2017; Mamede *et al.*, 2020). También ha demostrado su valor en antígenos virales, como las proteínas pre-F del virus sincitial bovino (RSV por sus siglas en inglés), la proteína L2 de la cápside del virus del papiloma humano tipo 16 (HPV16 por sus siglas en inglés), y en el desarrollo de anticuerpos monoclonales para la inmunización pasiva contra el virus de la inmunodeficiencia humana (HIV por sus siglas en inglés) (Negahdaripour *et al.*, 2017; Charleston & Graham, 2018; Anasir & Poh, 2019).

Selección de epítipo y estudios vacunológicos *in silico*

El diseño racional de una vacuna implica identificar epítopos capaces de estimular una respuesta inmune efectiva, mediada por linfocitos T y B. Para lograrlo, las bases de datos inmunoinformáticas son esenciales, ya que permiten predecir la estructura, especificidad, antigenicidad y alergenicidad de los epítopos, así como evaluar la interacción con adyuvantes (Bahrami *et al.*, 2019; Parvizpour *et al.*, 2020). Tras las fases de vacunología reversa y estructural, se genera un conjunto de posibles epítopos candidatos con potencial para interactuar con el MHC I y II de los linfocitos T, o con los receptores de los linfocitos B (Kardani *et al.*, 2020).

Los análisis computacionales permiten predecir la inducción de la respuesta inmune celular por linfocitos T, incluso cuando un antígeno presenta múltiples epítopos. Esto se logra mediante algoritmos que predicen la unión con las hendiduras del MHC I y MHC II. Existen dos enfoques principales para esta predicción:

- Métodos directos: Se centran en el diseño estructural del epítipo y/o su patrón de anfipaticidad o anfipaticidad, que le proporciona grupos hidrofílicos y lipofílicos a la molécula, permitiéndole interactuar con sustancias polares y apolares.
- Métodos indirectos: Analizan más allá de la simple unión epítipo-receptor, considerando patrones de diseño estructural, análisis de matrices cuantitativas (QM por sus siglas en inglés) y análisis tridimensional de relación estructura-función cuantitativa (3D-QSAR por sus siglas en inglés), entre otros (Kardani *et al.*, 2020).

Diversos programas se emplean para la predicción de epítopos estimuladores de linfocitos T, incluyendo PCPS®, Netchop 3.1®, TAPPred®, TAPhunter®, NetMHCcons 1.1®, NetMHC®, NetMHCpan®, PickPocket 1.1®, NetCTLpan 1.1®, nHLAPred®, EpiDOCK tool®, NetMHCpan 3.1®, PREDI-VAC®, BIMAS®, ProPred®, TEPITOPE®, CTLpred®, GLIPH® y PigMatrix® (Sunita *et al.*, 2019; Parvizpour *et al.*, 2020).

Para la predicción de epítomos específicos de MHC I, herramientas bioinformáticas como IEDB-AR® (base de datos de epítomos inmunes y recursos de análisis) son ampliamente utilizadas tanto para la predicción como para la verificación de la interacción epítomo-receptor. Otros sistemas populares incluyen NetCTL® (para epítomos virales), SVMHC® (para bacterianos) y SYFPEITHI® (para tumorales).

Por otra parte, la predicción de la interacción epítomo-MHC II es más compleja debido a la flexibilidad de unión en las hendiduras del MHC II. Para esta tarea, se utilizan herramientas como IEDB-AR® (para epítomos virales), Propred-II® (para bacterianos) y MHCpred® (para tumorales) (Kardani *et al.*, 2020; Raoufi *et al.*, 2020). Estos programas a menudo emplean dinámica molecular para el modelado de la interacción péptido-MHC, requiriendo resultados experimentales o secuencias de péptidos conocidas de bases de datos. Otras herramientas relevantes para la predicción de MHC II son EpiDOCK®, MotifScan®, RANKPEP®, MAPPP®, EPISOPT®, MHCpred®, Vaxign®, EpiTOP®, Propred®, BIMAS®, NetMHC® y WAPP® (Sánchez-Trincado *et al.*, 2017).

Los estudios inmunoinformáticos para epítomos de linfocitos B se centran en las características estructurales del antígeno. La predicción de epítomos lineales (continuos) es más común debido a su menor complejidad, basándose en propiedades de los aminoácidos como la carga eléctrica, la presencia de estructura secundaria, la hidrofiliidad y el área de exposición. Herramientas como BepiPred® son ampliamente utilizadas; este sistema no solo predice la interacción epítomo-receptor, sino que también considera las características fisicoquímicas del epítomo, empleando algoritmos basados en fundamentos como la predicción de antigenicidad de Kolaskar-Tongaonkar, la hidrofiliidad de Parker y las escalas de estructuras secundarias de Levitt (Kardani *et al.*, 2020; Raoufi *et al.*, 2020).

En contraste, la mayoría de los epítomos de linfocitos B son de tipo conformacional (discontinuos). Los estudios de predicción *in silico* para estos epítomos se basan principalmente en la secuencia de aminoácidos y la estructura tridimensional del antígeno. Discotope® destaca como uno de los sistemas bioinformáticos más empleados para esta tarea, dada su versatilidad para analizar antígenos de origen viral, bacteriano y tumoral (Kardani *et al.*, 2020; Parvizpour *et al.*, 2020). Otras herramientas útiles para el diseño de epítomos estimuladores de linfocitos B incluyen Vaxijen 2.0, Jenner Predict, VacSol, Vacceed, AntigenDB, PEPOP, SEPPA, Bpredictor, ABCPRED, BCPRED, SVMTriP, LBtope, CBtope, 3DEX, CEP, LASERGENE, MHCBN, LANL, SYFPEITHI e IEDB. El uso de estas herramientas ha permitido determinar que una longitud de 12 a 22 residuos de aminoácidos es ideal para una interacción óptima del epítomo con el linfocito B (Parvizpour *et al.*, 2020). Además de los epítomos, el modelado de anticuerpos es crucial para mejorar su afinidad. Programas como SCWRL, SCAP, PEARS, DRAGON, GADGET, RAMBLE y RAPPER se utilizan para el modelado de la estructura y conformación espacial de los anticuerpos (Sunita *et al.*, 2020).

Optimización de la formulación y seguridad de vacunas

Los estudios inmunoinformáticos también facilitan el diseño de adyuvantes y enlazadores epítipo-adyuvante. Esto incluye mejorar la memoria inmunológica y diversificar el repertorio antigénico. Se prefieren adyuvantes con alta afinidad por receptores de la inmunidad innata (como oligonucleótidos, lipopéptidos o quimiocinas sintéticas), tales como sales de aluminio (hidróxido y fosfato de aluminio) o complejos moleculares como flagelina, lipopolisacáridos y receptores tipo Toll (TLR por sus siglas en inglés). Sistemas bioinformáticos específicos como Vaxjo® (para adyuvantes peptídicos), VaccineDA® (para oligodesoxinucleotídicos) e imRNA (para adyuvantes basados en ARN) agilizan este análisis. Los enlazadores entre antígeno y adyuvante son vitales para la estabilidad estructural y la correcta presentación de los epítopos a linfocitos B y T; sin embargo, interacciones anómalas entre dominios funcionales pueden generar estructuras secundarias y terciarias que reduzcan la actividad biológica de la vacuna (Kardani *et al.*, 2020; Parvizpour *et al.*, 2020).

Adicionalmente, la evaluación *in silico* de antigenicidad, alergenidad y toxicidad es posible mediante sistemas bioinformáticos que simulan la capacidad de un antígeno o epítipo para estimular la producción de inmunoglobulinas E (IgE), lo que podría indicar una respuesta inmunológica exacerbada o anormal (Kardani *et al.*, 2020). La optimización de la respuesta inmune incluye la extensión de la memoria a largo plazo, la renovación de la respuesta en pacientes de edad avanzada mediante la estimulación de neutrófilos, eosinófilos, basófilos, macrófagos y monocitos, el aumento del repertorio de anticuerpos y la posibilidad de reducir las dosificaciones de las vacunas (Sunita *et al.*, 2019; Parvizpour *et al.*, 2020).

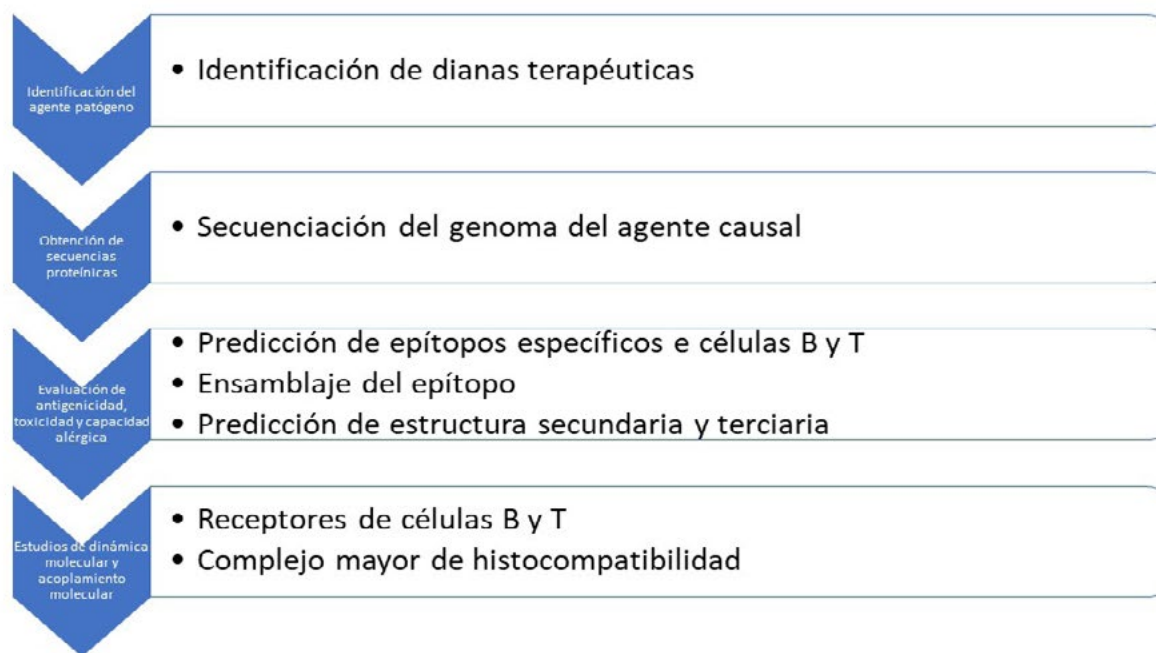
Acoplamiento molecular y diseño de vacunas

Finalmente, los estudios de simulación de acoplamiento molecular (*molecular docking*) permiten elucidar los posibles sitios de interacción entre los epítopos y los sitios activos de los receptores específicos de los linfocitos T y B, basándose en las variaciones de la energía libre o energía de unión. Existen tres tipos principales de análisis de interacción:

- Acoplamiento local (*local docking*): Se restringe a la estructura de un sitio de unión específico entre epítipo y receptor.
- Acoplamiento global (*global docking*): Involucra la combinación de posibles estados activos e inactivos de los receptores, considerando sus conformaciones flexibles y rígidas junto con los epítopos.
- Acoplamiento basado en modelado (*template-based docking*): Utiliza complejos preexistentes o “plantillas” para predecir interacciones entre entidades.

Para estas funciones, se emplean sistemas bioinformáticos como AutoDock Vina®, Patchdock®, Molegro Virtual®, Cluspro 2.0® y Python Prescription® (Kardani *et al.*, 2020; Raoufi *et al.*, 2020). El proceso general del diseño de vacunas basado en epítomos se ilustra en la Figura 5.

Figura 5. Proceso general en el diseño de vacunas basado en epítomos



Aplicación de las herramientas de predicción de epítomos para diferentes patologías

La inmunoinformática se ha establecido como una herramienta esencial para la predicción de epítomos en una amplia gama de enfermedades, incluyendo infecciones bacterianas, fúngicas y virales, así como en patologías no infecciosas como el cáncer (Raoufi *et al.*, 2020). A continuación, se presentan ejemplos ilustrativos de su aplicación en el diseño de vacunas en humanos y animales.

Vacuna multiepítopo contra salmonelosis

Un estudio de Zafar *et al.* (2022) abordó el diseño de una vacuna multiepítopo contra *Salmonella typhimurium*, una enterobacteria de incidencia global que puede causar meningitis y septicemia. Las vacunas pediátricas existentes han mostrado eficacia parcial y un riesgo de alergias, debido a su enfoque

en múltiples proteínas del patógeno. Para superar estas limitaciones, los autores se concentraron en la proteína To1A, conocida por estimular linfocitos T citotóxicos, colaboradores y células productoras de interferones.

El proceso comenzó con la evaluación de la antigenicidad de las proteínas de *S. typhimurium* utilizando Vaxijen 2.0® (con un umbral de 0.4), que permite superar las limitaciones del alineamiento de proteínas. Tras identificar la proteína To1A como la de mayor antigenicidad, se empleó NetCTL 2.0® para predecir epítopos estimuladores de linfocitos T citotóxicos y Vaxijen 2.0® para epítopos de linfocitos T colaboradores. Una vez seleccionados los epítopos, se predijo su estructura final con trRosetta®, complementado con análisis ProSA-web y gráficos de Ramachandran para evaluar la calidad del diseño vacunal. Para confirmar la seguridad, se utilizó AllerTOP® para descartar el potencial alergénico, seguido de un estudio de acoplamiento molecular con los receptores TLR2 y TLR4. Las simulaciones *in silico* confirmaron que la vacuna diseñada no induce alergias y exhibe un acoplamiento favorable con el receptor TLR4 (mediado por lisina 58) y el TLR2 (mediado por glutamina 198 y asparagina 199).

Diseño de una vacuna multiepítipo contra COVID-19

Otro ejemplo relevante es el diseño de una vacuna multiepítipo contra COVID-19, realizado por Ahmad *et al.* (2020) en una etapa temprana de la pandemia, antes de la disponibilidad de vacunas comerciales. Los investigadores buscaron proteínas de coronavirus en bases de datos, seleccionando inicialmente proteínas de adhesión. Para la selección de epítopos con potencial de unirse al MHC de ambos tipos, se consultó la Immune Epitope Database con un umbral de 0.5. Posteriormente, se utilizó MHCpred 2.0 para predecir la afinidad con un criterio de selección de concentración inhibitoria (IC₅₀) menor a 100 nM. La virulencia y antigenicidad de los epítopos seleccionados se valoraron con VirulentPred y Vaxijen 2.0, mientras que AllerTOP 2.0 se empleó para descartar epítopos alergénicos. Los epítopos seleccionados se ensamblaron utilizando la subunidad B de la toxina del cólera como adyuvante, y se realizó la caracterización fisicoquímica del péptido ensamblado, así como su acoplamiento con los receptores TLR3 y TLR4.

El estudio identificó siete proteínas antigénicas (nsp8, nsp9, nsp10, proteína similar a la proteinasa 3C, glicoproteína de la espícula, glicoproteína de superficie y la poliproteína ORF1ab), todas con funciones específicas en la patogenicidad de los coronavirus. De estas, nsp8, la proteína similar a la proteinasa 3C y la glicoproteína de la espícula fueron seleccionadas para ensamblar la vacuna multiepítipo. Se determinó que el péptido ensamblado interactúa con el TLR3 mediante interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno con residuos específicos (Histidina 156, 359, 410, 432; Ácido Aspártico 180, 229, 230, 257, 284, 285, 457; Lisina 201, 382; Ácido Glutámico 203, 301, 358, 434,

533; Serina 206, 254, 256, 282, 306; Fenilalanina 227, 304, 459; Tirosina 283, 302, 307, 383; Arginina 325; Isoleucina 411; Glicina 431; Prolina 408; y Glutamina 483). Para el receptor TLR4, se observaron interacciones con los residuos Prolina 23, 113; Ácido glutámico 24, 89; Serina 25, 184; Ácido Aspártico 44, 50, 51, 137, 160; Lisina 47, 86; Arginina 67, 87; Glutamina 115; Histidina 159 de la cadena C; Lisina 20; Fenilalanina 64; y Ácido aspártico 114.

Ahmad *et al.* (2020) realizaron un estudio pionero en el diseño de una vacuna multiepítipo contra COVID-19, en un momento crucial cuando aún no se disponía de vacunas comerciales. Los autores comenzaron su investigación buscando proteínas de coronavirus en bases de datos, con especial interés en proteínas de adhesión. Para la selección de epítopos con potencial de unirse a ambos tipos de MHC, se consultó la Immune Epitope Database, utilizando un umbral de 0.5. Posteriormente, se empleó MHCpred 2.0 para predecir la afinidad con un criterio de selección de concentración inhibitoria (IC₅₀) menor a 100 nM. La virulencia y antigenicidad de los epítopos seleccionados fueron valoradas con VirulentPred y Vaxijen 2.0, respectivamente, mientras que AllerTOP 2.0 se utilizó para descartar aquellos epítopos que pudieran causar alergias. Una vez seleccionados, los epítopos se ensamblaron utilizando la subunidad B de la toxina del cólera como adyuvante. Finalmente, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica del péptido ensamblado y se estudió su acoplamiento con los receptores TLR3 y TLR4.

El estudio identificó siete proteínas antigénicas clave: nsp8, nsp9, nsp10, proteína similar a la proteinasa 3C, glicoproteína de la espícula, glicoproteína de superficie y la poliproteína ORF1ab. Todas estas proteínas cumplen funciones específicas en la patogenicidad de los coronavirus. De estas, nsp8, la proteína similar a la proteinasa 3C y la glicoproteína de la espícula fueron las seleccionadas para ser ensambladas en la vacuna multiepítipo. Se determinó que el péptido resultante interactúa con el TLR3 mediante interacciones hidrofóbicas y puentes de hidrógeno con un amplio conjunto de residuos, incluyendo Histidina (156, 359, 410, 432), Ácido aspártico (180, 229, 230, 257, 284, 285, 457), Lisina (201, 382), Ácido glutámico (203, 301, 358, 434, 533), Serina (206, 254, 256, 282, 306), Fenilalanina (227, 304, 459), Tirosina (283, 302, 307, 383), Arginina (325), Isoleucina (411), Glicina (431), Prolina (408) y Glutamina (483). En el caso del receptor TLR4, se identificaron interacciones con los residuos Prolina (23, 113), Ácido Glutámico (24, 89), Serina (25, 184), Ácido aspártico (44, 50, 51, 137, 160), Lisina (47, 86), Arginina (67, 87), Glutamina (115), Histidina 159 de la cadena C, Lisina 20, Fenilalanina 64 y Ácido aspártico 114.

Vacunología reversa para COVID-19

Otro estudio significativo en el contexto de COVID-19 es la aplicación de la vacunología reversa, reportada por Nemati *et al.* (2021). En esta investigación, los autores diseñaron una vacuna multiepítipo mediante la búsqueda inicial de proteínas asociadas a COVID-19, junto con las estructuras tridimen-

sionales de los TLR3, TLR4, MHC I y MHC II. Las secuencias seleccionadas para su evaluación como potenciales epítomos de linfocitos B y T fueron la proteína de la envoltura, y las proteínas ORF7b, ORF8, ORF10 y nsp9. La predicción se realizó utilizando BepiPred 2.0 y la Immune Epitope Database. Estos epítomos fueron elegidos por su ausencia de toxicidad y alergenicidad, y por mostrar alta antigenicidad, evaluados con los programas ToxinPred, Vaxijen 2.0 y AllerTOP 2.0.

Posteriormente, se emplearon adyuvantes de naturaleza proteica para unir los epítomos. La caracterización fisicoquímica, estabilidad y elucidación estructural se llevaron a cabo utilizando programas como ProtParam, Pepcalc, Lupred 2a, Prabi e I-TASSER. El acoplamiento molecular se realizó con Cluspro. Como resultado, obtuvieron una proteína hidrosoluble de 39.4 KDa de peso molecular, con un punto isoelectrico de 9.6 y una vida media de 30 horas en células de mamíferos, presentando mayor afinidad por el TLR3. Con base en estos hallazgos, los autores proponen el epítomo obtenido como un candidato prometedor para la vacunación contra COVID-19.

Diseño de vacunas inmunoinformáticas contra el cáncer

En el ámbito de las enfermedades no infecciosas, Savsani *et al.* (2021) reportaron el diseño de una vacuna contra el carcinoma de células escamosas, focalizándose en el oncogén HRAS, responsable de expresar la proteína H-Ras, que está involucrada en transporte, apoptosis celular y vías de señalización de calcio. Los autores describen en detalle el mecanismo de acción de una vacuna intramuscular diseñada para inducir una fuerte afinidad por el antígeno de HLA. Este péptido, al entrar en la célula, se fragmentaría en el retículo endoplásmico, se uniría al HLA y se expresaría extracelularmente, buscando la interacción con los linfocitos T y la consecuente secreción de INF- γ .

Para lograrlo, los autores buscaron la secuencia de la proteína HRAS nativa y sus mutaciones más comunes. Posteriormente, utilizaron la herramienta NetMHCpan EL 4.1 para predecir la afinidad de los epítomos, cotejando los resultados con la Immune Epitope Database. La antigenicidad, toxicidad y alergenicidad del epítomo se predijeron utilizando VaxiJen, ToxinPred y AllerTop, respectivamente. Para verificar la entrada a la célula y la secreción de INF- γ como respuesta inmunitaria, se emplearon CellPPD e INFepitope. Finalmente, se realizaron pruebas preclínicas en modelos murinos. De los epítomos registrados, se seleccionaron 16 epítomos derivados de nueve mutaciones diferentes.

Vacuna multiepítomo contra el sarcoma de Kaposi asociado al HHV-8

Chauhan *et al.* (2019) reportaron el diseño de una vacuna multiepítomo para combatir el sarcoma de Kaposi, una enfermedad que afecta principalmente a pacientes con el HIV. Dada la agresividad de los

tratamientos actuales (antivirales y antineoplásicos), se ha hecho imperativa la búsqueda de estrategias que estimulen el sistema inmune para prevenir infecciones virales y combatir neoplasias. Los autores buscaron una vacuna capaz de estimular linfocitos T y B, induciendo la producción de IFN- γ .

En su estudio, obtuvieron secuencias de glicoproteínas del HHV-8 y las alinearon con Clustal W, verificando que no tuvieran similitudes con secuencias humanas. Se utilizó Vaxijen 2.0 para confirmar la antigenicidad, identificando cinco glicoproteínas como las más antigénicas. Posteriormente, se predijo y modeló la estructura de la proteína usando gráficos de Ramachandran. Para la búsqueda de epítomos específicos para linfocitos T citotóxicos, se empleó NetCTL 1.2 e IEDB, mientras que Net MHC II pan 3.2 se utilizó para predecir siete epítomos antigénicos para linfocitos T colaboradores. Para los epítomos de linfocitos B, se ocupó BCpred 2.0, detectando 18 epítomos. Finalmente, el programa IFN epitope se usó para predecir epítomos reactivos a IFN- γ .

Vacuna contra la nocardiosis

La nocardiosis, causada por *Nocardia asteroides*, es una infección que afecta a pacientes inmunocomprometidos (por HIV, neoplasias, diabetes o desórdenes genéticos). Patra *et al.* (2020) diseñaron una vacuna multiepítomo, focalizándose en los factores de virulencia de la bacteria, específicamente en la familia de proteínas Mce, conocidas por su papel en la virulencia y patogenicidad. Su objetivo fue inducir la proliferación de linfocitos B y T.

Para la predicción de epítomos de linfocitos B, se utilizó ABCpred. Los epítomos específicos para linfocitos T y MHC de ambos tipos fueron predichos con ProPred y ProPred-I, respectivamente. Una vez predichos, la antigenicidad de los epítomos se determinó con VaxiJen 2.0. Dado que el diseño resultó en un péptido de corta longitud, se utilizaron DISTILL 2.0 y PROCHECK para analizar la estereoquímica de la proteína. Los resultados mostraron 20 epítomos de 20 aminoácidos de longitud para linfocitos B; de estos, 13 también interactuaron con el MHC y los linfocitos T, aunque solo tres epítomos mostraron un potencial antigénico significativo.

Diseño de vacunas veterinarias basadas en epítomos

Vacuna contra *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar ovis

Rodríguez-Domínguez *et al.* (2023) llevaron a cabo un estudio para desarrollar una vacuna contra *Corynebacterium pseudotuberculosis* biovar ovis, una bacteria intracelular que causa linfadenitis caseosa en ovejas. Basándose en estudios previos (Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2022) donde identificaron la fosfolipasa

D 2J-L (PLD-2J-L) y la endoglicosidasa 2J-L (CP40-2J-L) como factores de virulencia con potencial vacunal, los investigadores emplearon la base de datos IEDB y el software BepiPred 2.0 para predecir epítomos lineales. Se buscaron secuencias con alta antigenicidad, afinidad por anticuerpos y buena exposición para linfocitos B, obteniendo 10 epítomos lineales de PLD-2J-L y 12 de CP40-2J-L.

Posteriormente, con BepiPred 2.0, la escala de accesibilidad superficial de Emini, la escala de antigenicidad de Kolaskar-Tongaonkar y ElliPro, se identificaron 50 epítomos conformacionales de PLD-2J-L y 47 de CP40-2J-L. Esto permitió establecer 11 regiones en PLD-2J-L y 12 en CP40-2J-L que cumplen con los criterios para estimular la inmunidad humoral (producción de anticuerpos IgG) y la inmunidad celular tipo Th1 (producción de citocinas). Finalmente, las predicciones de epítomos para linfocitos T (CD4+/CD8+) con NetMHCpan mostraron qué péptidos de PLD-2J-L y CP40-2J-L pueden interactuar con MHC I y MHC II. Estos resultados, en conjunto, respaldan la selección de regiones antigénicas para una vacuna eficaz contra *Corynebacterium pseudotuberculosis biovar ovis* capaz de inducir respuestas inmunes celular y humoral.

Vacuna multiepítomo contra la histoplasmosis

La histoplasmosis, causada por el hongo *Histoplasma capsulatum*, es una enfermedad con alta morbilidad y mortalidad para la cual no existe vacuna. Afecta a diversas especies animales (caninos, felinos, equinos) y humanos, manifestándose desde formas asintomáticas hasta crónicas diseminadas (Martínez-Cepeda y Revelo-Ruales, 2017; Mittal *et al.*, 2019). Con el objetivo de desarrollar una vacuna multiepítomo a partir de cinco proteínas antigénicas, Márquez *et al.* (2024) realizaron la predicción y análisis de epítomos para linfocitos B y los complejos MHC I y MHC II. Se utilizaron ABCpred y la base de datos IEDB, respectivamente.

Los resultados evidenciaron 23 epítomos para MHC I y linfocitos B, 11 para MHC II y B, y 4 vinculados a la subunidad B de la toxina del cólera (como adyuvante). Para predecir las características fisicoquímicas (antigenicidad, estabilidad, peso molecular y punto isoeléctrico), se utilizó VaxiJen, obteniéndose resultados favorables. Otras herramientas informáticas como HDOCK, PDBpisa, LigPlot2, HawkDock y simuladores *in silico* se emplearon para evaluar la afinidad con los receptores TLR4 y la estimulación de linfocitos B. Estos análisis demostraron un aumento en la producción de linfocitos B de memoria y linfocitos T colaboradores del tipo 1, productores de citocinas fundamentales para la eliminación de patógenos intracelulares, lo que hace de este diseño un candidato ideal para una vacuna contra *Histoplasma capsulatum*.

Vacuna contra el virus de la diarrea epidémica porcina (PEDV)

En un esfuerzo por desarrollar una vacuna eficaz contra el virus de la diarrea epidémica porcina (PEDV), dada su elevada tasa de mortalidad en lechones, Hou *et al.* (2023) diseñaron una vacuna multiepítipo basada en las proteínas S (espículas) de las cuatro variantes de PEDV G2 (G2a, G2b, G2c y G2d). La predicción de epítomos lineales y conformacionales para linfocitos B, así como para linfocitos T colaboradores y citotóxicos, se realizó con IEDB (método Bepipred), DiscoTope, NetMHCIIpan 4.0 e IEDB, respectivamente, obteniendo 4 epítomos lineales para linfocitos B, 6 epítomos conformacionales, 11 para Th y 9 para TC.

Adicionalmente, se evaluaron propiedades fisicoquímicas (ProtParam), antigenicidad (VaxiJen 2.0), inmunogenicidad (C-ImmSim), alergenicidad (AllerTOP 2.0), estabilidad (GROMACS) y afinidad (ClusPro), obteniendo resultados positivos. La calidad de las cuatro variedades proteicas se demostró mediante la elaboración de una estructura tridimensional con SWISS-MODEL. Los resultados sugirieron la posibilidad de estimulación de la inmunidad celular y humoral; sin embargo, los autores recomiendan la realización de estudios *in vitro* e *in vivo*.

Vacuna quimérica multiepítipo contra Leptospirosis

Investigaciones previas (Dellagostin *et al.*, 2011; McBride *et al.*, 2005) han señalado desventajas en el uso de vacunas inactivadas contra *Leptospira spp.*, como la protección homóloga limitada y los efectos secundarios. Para superar estas limitaciones, Kumar *et al.* (2021) desarrollaron una vacuna quimérica multiepítipo contra la leptospirosis, una zoonosis causada por la bacteria Gram negativa *Leptospira spp.*, que incluye serogrupos como Icterohaemorrhagiae, Grippotyphosa, Pomona y Pyrogenes (Orozco *et al.*, 2021; Pérez *et al.*, 2023).

Los investigadores predijeron epítomos para MHC I, MHC II, y epítomos conformacionales y lineales para linfocitos B, partiendo de las proteínas similares a inmunoglobulinas LigA y LigB, previamente identificadas (Lin y Chang, 2007). Para ello, utilizaron un conjunto de herramientas informáticas como I-TASSER, GalaxyRefine, Swiss-PdbViewer, DiscoTope2.0, ElliPro, BEPro, ABCpred, BCpred, BepiPred 2.0, IEDB, ProPred-1, NetMHC 4.0 y NetMHC-II 2.3. Para evaluar la antigenicidad, alergenicidad y los parámetros fisicoquímicos, recurrieron a los servidores VaxiJen 2.0, AllerTop 2.0 y ProtParam, respectivamente. Los resultados generales mostraron cinco epítomos prometedores, con un aumento en la población de linfocitos B, producción de inmunoglobulinas M (IgM) y niveles elevados de interferón γ INF- γ . No obstante, se recomienda la realización de pruebas *in vitro* e *in vivo* antes de su producción a gran escala.

Vacuna contra la brucelosis

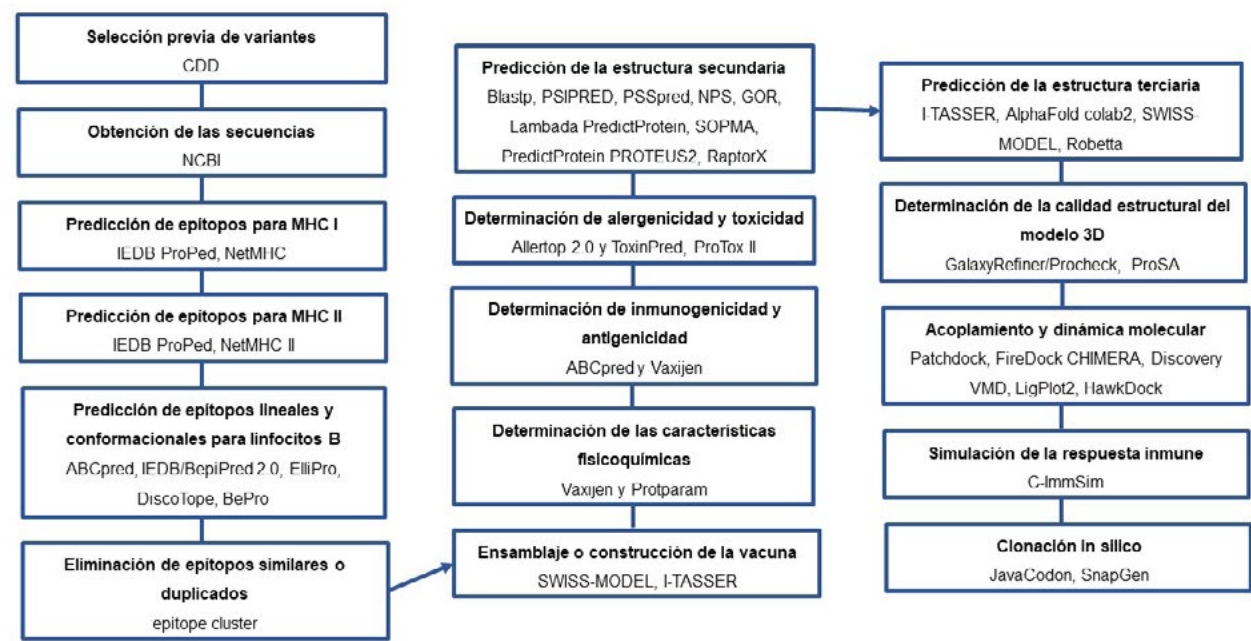
La brucelosis, una enfermedad bacteriana con alta morbilidad en animales no vacunados, representa un riesgo significativo para la salud pública y causa pérdidas económicas en la ganadería. Es causada por la bacteria intracelular Gram negativa *Brucella* (ej. *B. abortus*, *B. melitensis*, *B. suis*), que afecta a bovinos, ovinos y cerdos. Al ser una zoonosis, la infección puede transmitirse a humanos por ingesta de productos lácteos no pasteurizados o por contacto directo (Laverde *et al.*, 2021). En México, la Campaña Nacional contra la Brucelosis en los Animales (NOM-041-ZOO-1995) establece acciones de prevención, incluida la vacunación (SENASICA, 2021).

Con el propósito de desarrollar una vacuna multiepítipo, Elrashedy *et al.* (2024) utilizaron las proteínas BvrR y las proteínas de membrana externa OMP25 y OMP31, identificadas como factores de virulencia por su participación en la evasión inmune y la supervivencia intracelular de la bacteria. Se emplearon los servidores VMTriP, Bepipred 2.0, RankPep, SYFPEITHI y MHCII-NP para la predicción de epítomos de linfocitos B, MHC I y MHC II. Los resultados mostraron 5 (BvrR), 6 (OMP25) y 5 (OMP31) epítomos para interacción con linfocitos B; 3 (BvrR), 4 (OMP25) y 4 (OMP31) para MHC I; y 4 (BvrR), 5 (OMP25) y 4 (OMP31) para MHC II. Características como la antigenicidad, toxicidad y alergenicidad se evaluaron con VaxiJen v2.0, AllergenFP y ToxinPred, respectivamente. Los resultados son prometedores para la manufactura de una vacuna contra brucelosis; sin embargo, los autores recomiendan la realización de pruebas *in vitro* e *in vivo* previo a su producción.

Consistencia metodológica en el diseño de vacunas

Es evidente que, tanto en la investigación en medicina humana como en el campo de la medicina veterinaria y zootecnia (MVZ), los estudios para el diseño de vacunas basadas en epítomos emplean procedimientos y recursos computacionales similares. Un ejemplo destacado es el uso de la base de datos IEDB y sus diversas herramientas, que permiten la identificación de epítomos específicos de enfermedades infecciosas y no infecciosas, y que son reconocibles por linfocitos T citotóxicos (Tc), T colaboradores (Th) y linfocitos B. Según Hou *et al.* (2023), estos recursos incluso ofrecen la prometedora posibilidad de crear vacunas multiepítipo universales, aplicables en distintas especies animales, incluyendo humanos. El conjunto de procedimientos, programas y servidores utilizados en las investigaciones consultadas se resume, de manera general, en la Figura 6.

Figura 6. Procedimiento, programas y servidores utilizados por investigadores



Para asegurar una mayor fiabilidad en la selección de epítopos, los investigadores utilizan múltiples programas y servidores de manera conjunta (Rodríguez-Domínguez *et al.*, 2023). Por ejemplo, Kumar *et al.* (2021) emplearon varios servidores para predecir epítopos conformationales y lineales para linfocitos B, así como para MHC I y MHC II, obteniendo resultados favorables. Del mismo modo, Elrashedy *et al.* (2024) utilizaron hasta nueve servidores con el objetivo de aumentar la precisión en las predicciones de la estructura secundaria, lo que les permitió identificar el servidor más fiable (PredictProtein). También destacaron que los mejores modelos tridimensionales (3D) de las proteínas estructurales se obtuvieron con los servidores AlphaFold e I-TASSER. Otros ejemplos se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2. Programas y servidores utilizados simultáneamente por investigadores en salud pública y animal para la selección de epítopos

Vacuna contra	Programas y servidores utilizados	Determinación	Cita
COVID	SCRATCH protein predictor I-TASSER SWISS-MODEL Galaxyweb Design	Ensamblaje	Ahmad, S., Navid, A., Farid, R., Abbas, G., Ahmad, F., Zaman, N., Parvaiz, N., & Azam, S. S., 2020, "Design of a novel multi epitope-based vaccine for pandemic coronavirus disease (COVID-19) by vaccinomics and probable prevention strategy against avenging zoonotics", European Journal of Pharmaceutical Sciences, 151, 105387.
	Patchdock FireDock Chimera Discovery VMD	Acoplamiento y dinámica molecular	
Sarcoma de Kaposi	NCBI Clustal-Omega MEGA	Selección de proteínas	Chauhan, V., Rungta, T., Goyal, K., & Singh, M. P., 2019, "Designing a multi-epitope based vaccine to combat Kaposi Sarcoma utilizing immunoinformatics approach", Scientific Reports, 9(1):1-15.
	Phyre 2 Raptor X I-TASSER RAMPAGE	Predicción de la estructura	
COVID	Virus pathogen resource database Protein Variability Muscle	Selección de proteínas	de Oliveira, C. D. M., da Silva, M. K., Barbosa, E. D., Leow, C. Y., Fulco, U.L., Oliveira, J. I.N., 2022, "Exploiting reverse vaccinology approach for the design of a multi-epitope subunit vaccine against the major SARS-CoV-2 variants", Comput Biol Chem, 101:107754

Leptospirosis	ABCPred BCPred BepiPred 2.0	Predicción de epítomos lineales para linfocitos B	Kumar, P., Lata, S., Shankar, U. N., Akif, M., 2021, "Immunoinformatics-based designing of a multi-epitope chimeric vaccine from multi-domain outer surface antigens of <i>Leptospira</i> ", <i>Front Immunol</i> , 12:735373. DOI: 10.3389/fimmu.2021.735373. PMID: 34917072; PMCID: PMC8670241.
	DiscoTope Ellipro BEpro	Predicción de epítomos conformacionales para linfocitos B	
	IEDB ProPed-I NetMHC	Predicción de epítomos para MHC I	
	IEDB ProPed NetMHC II	Predicción de epítomos para MHC II	
Brucelosis	PSIPRED PSSpred PredictProtein NPS GOR Lambada PredictProtein SOPMA PROTEUS2 RaptorX CFSSP	Predicción de la estructura secundaria	Elrashedy, A., Nayel, M., Salama, A. <i>et al.</i> , 2024, "Bioinformatics approach for structure modeling, vaccine design, and molecular docking of <i>Brucella</i> candidate proteins BvrR, OMP25, and OMP31", <i>Sci Rep</i> , 14:11951 DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-024-61991-7
	AlphaFold I-TASSER]	Modelos en 3D de las proteínas estructurales	

CONCLUSIONES

La inmunoinformática y las herramientas computacionales han transformado radicalmente el diseño de vacunas, consolidándose como un pilar fundamental en la selección racional de epítopos. Este proceso, ahora asistido por algoritmos y bases de datos, permite un análisis detallado de datos biológicos para identificar epítopos con alta afinidad por linfocitos B, MHC I y MHC II. La precisión en la selección se basa en una evaluación rigurosa de criterios como el número de residuos de aminoácidos, la conformación del epítipo, su antigenicidad, inmunogenicidad, estabilidad, y la ausencia de toxicidad o alergenidad.

La integración de estas herramientas computacionales ha demostrado ser crucial para acelerar el desarrollo de vacunas. Esto se evidencia en la capacidad de diseñar candidatos vacunales para enfermedades infecciosas y no infecciosas en un tiempo significativamente menor y con una inversión reducida. La aprobación de vacunas como la de COVID-19, con un diseño inicial basado en estas técnicas y complementado por estudios *in vitro* e *in vivo*, subraya el potencial y la eficacia de este enfoque.

Aunque los programas y servidores de inmunoinformática son poderosos simuladores que ofrecen resultados muy prometedores en la predicción de epítopos, sus propiedades biológicas y características fisicoquímicas, los investigadores coinciden en que las pruebas *in vitro* e *in vivo* son indispensables para validar estos hallazgos. Esto garantiza la seguridad y eficacia real de los candidatos vacunales. Para futuras investigaciones, sería valioso realizar pruebas comparativas exhaustivas entre los diversos recursos inmunoinformáticos a lo largo de todo el procedimiento de diseño, lo que podría optimizar aún más el proceso y consolidar la metodología.

RECONOCIMIENTO

Figuras 1 a 3 creadas por María Fernanda Sánchez Castilleja utilizando la aplicación BioRender.com
Figura 4 creada por José de Jesús Lira Ricárdez y Lucía Ortega Cabello con información tomada de Han (2015).

Figura 5 creada por José de Jesús Lira Ricárdez y Lucía Ortega Cabello.

Figura 6 creada por María Fernanda Sánchez Castilleja.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbas, A. K., Lichtman, A. H., Pillai, S., 2023. *Basic Immunology*. Ed. Elsevier. 7ª. edición.
- Abuawwad, M. T., Taha, M. J. J., Taha, A. J., Kozaa, Y. A., Falah, O., Abuawwad, I. T., Hammad, E. M., Mahmoud, A. A., Aladawi, M., Serhan, H. A., 2024. *Guillain-Barré syndrome after COVID-19 vaccination: A systematic review and analysis of case reports*. *Clin Neurol and Neurosurg*, 238:1359-1375.e13. <https://doi.org/10.1016/j.clineuro.2024.108183>
- Ahmad, S., Navid, A., Farid, R., Abbas, G., Ahmad, F., Zaman, N., Parvaiz, N., & Azam, S. S., 2020. Design of a novel multi epitope-based vaccine for pandemic coronavirus disease (COVID-19) by vaccinomics and probable prevention strategy against avenging zoonotics. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 151, 105387. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJPS.2020.105387>
- Anasir, M. I., & Poh, C. L., 2019. Structural vaccinology for viral vaccine design. *Frontiers in Microbiology*, 10(MAR), 738. DOI: <https://doi.org/10.3389/FMICB.2019.00738/BIBTEX>
- Anupamjeet Kaur, Amit Kumar, Geetika Kumari, Rasmiranjan Muduli, Mayami Das, Rakesh Kundu, Suprabhat Mukherjee, Tanmay Majumdar, 2024. Rational design and computational evaluation of a multi-epitope vaccine for monkeypox virus: Insights into binding stability and immunological memory. *Heliyon*, 10(16). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36154>.
- Arce, G. L., Ramírez, A. L. A., De Los Reyes, G. C. A., Hernández, O. J. F., 2021. *Guillain-Barre syndrome after vaccination for Covid-19. The first report in Latin America*. *Neurol Perspect*, 1(4):236-238. DOI: 10.1016/j.neurop.2021.09.002. PMCID: PMC8443312
- Bahrami, A. A., Payandeh, Z., Khalili, S., Zakeri, A., & Bandehpour, M., 2019. Immunoinformatics: In silico approaches and computational design of a multi-epitope, immunogenic protein. *International Reviews of Immunology*, 38(6):307–322. DOI: <https://doi.org/10.1080/08830185.2019.1657426>
- Bidmos, F. A., Siris, S., Gladstone, C. A., & Langford, P. R., 2018. Bacterial vaccine antigen discovery in the reverse vaccinology 2.0 Era: Progress and challenges. *Frontiers in Immunology*, 9(OCT), 2315. DOI: <https://doi.org/10.3389/FIMMU.2018.02315/BIBTEX>
- Brisse, M., Vrba, S. M., Kirk, N., Liang, Y., & Ly, H., 2020. Emerging concepts and technologies in vaccine development. *Frontiers in Immunology*, 11, 2578. DOI: <https://doi.org/10.3389/FIMMU.2020.583077/BIBTEX>
- Bruno, L., Cortese, M., Rappuoli, R., & Merola, M., 2015. Lessons from reverse vaccinology for viral vaccine design. *Current Opinion in Virology*, 11:89–97. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COVIRO.2015.03.001>
- Charleston, B., Graham, S. P., 2018. Recent advances in veterinary applications of structural vaccinology. *Current Opinion in Virology*, 29:33-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coviro.2018.02.006>

- Chauhan, V., Rungta, T., Goyal, K., & Singh, M. P., 2019. Designing a multi-epitope based vaccine to combat Kaposi Sarcoma utilizing immunoinformatics approach. *Scientific Reports*, 9(1):1–15. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39299-8>
- Clem, A. S., 2011. Fundamental of vaccine immunology. *Journal of Global Infectious Diseases*. 3(1):73–78. DOI: <https://doi.org/10.4103/0974-777X.77299>
- de Oliveira, C. D. M., da Silva, M. K., Barbosa, E. D., Leow, C. Y., Fulco, U. L., Oliveira, J. I.N., 2022. Exploiting reverse vaccinology approach for the design of a multiepitope subunit vaccine against the major SARS-CoV-2 variants. *Comput Biol Chem*, 101:107754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2022.107754>.
- da Silva, M. K., Fulco, U. L., da Silva, J. E. D., Oliveira, J. I. N., 2022. Moving targets: COVID-19 vaccine efficacy against Omicron subvariants. *Mol Ther*, 30(8):2644–5. DOI: <https://doi.org/10.1002/jmv.27017>.
- Dellagostin, O. A., Grassmann, A. A., Hartwig, D. D., Félix, S. R., Da Silva, É. F., McBride, A. J. A., 2011. Recombinant vaccines against leptospirosis. *Hum Vaccin*, 7:1215–24. doi: 10.4161/hv.7.11.17944
- Ekins, S., Mestres, J., Testa, B., 2007. *In silico* pharmacology for drug discovery: methods for virtual ligand screening and profiling. *British Journal of Pharmacology*, 152(1):9–20. DOI: <https://doi.org/10.1038/sj.bjp.0707305>
- Elrashedy, A., Nayel, M., Salama, A. *et al.*, 2024. Bioinformatics approach for structure modeling, vaccine design, and molecular docking of *Brucella* candidate proteins BvrR, OMP25, and OMP31. *Sci Rep*, 14:11951 DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61991-7>
- Fleri, W., Paul, S., Dhanda, S. K., Mahajan, S., Xu, X., Peters, B., & Sette, A., 2017. The immune epitope database and analysis resource in epitope discovery and synthetic vaccine design. *Frontiers in Immunology*, 8:278. DOI: <https://doi.org/10.3389/FIMMU.2017.00278/BIBTEX>
- Grassmann, A. A., Kremer, F. S., Santos, J. C. dos, Souza, J. D., Pinto, L. da S., & McBride, A. J. A., 2017. Discovery of novel leptospirosis vaccine candidates using reverse and structural vaccinolog. *Frontiers in Immunology*, 8(APR):463. DOI: <https://doi.org/10.3389/FIMMU.2017.00463/BIBTEX>
- Han, S., 2015. Clinical vaccine development. *Clinical and experimental vaccine research*, 4(1):46–53. DOI: <https://doi.org/10.7774/cevr.2015.4.1.46>
- Hou, W., Wu, H., Wang, S., Wang, W., Wang, B., Wang, H., 2023. Designing a multi-epitope vaccine to control porcine epidemic diarrhea virus infection using immunoinformatics approaches. *Front Microbiol*, 14(14):1264612. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1264612.
- Kardani, K., Bolhassani, A., & Namvar, A., 2020. An overview of in silico vaccine design against different pathogens and cancer. *Expert Review of Vaccines*, 19(8):699–726. doi: <https://doi.org/10.1080/14760584.2020.1794832>

- Kumar, P., Lata, S., Shankar, U. N., Akif, M., 2021. Immunoinformatics-based designing of a multi-epitope chimeric vaccine from multi-domain outer surface antigens of *Leptospira*. *Front Immunol*, 12:735373. DOI: 10.3389/fimmu.2021.735373. PMID: 34917072; PMCID: PMC8670241.
- Laverde, A. J., Restrepo-Botero, D., Hernández-Pulido, D., Rodríguez-Bautista, J. L., Sandoval I. S., 2021. Seroprevalencia de *Brucella canis* en perros de un refugio para animales de compañía en Bogotá, Colombia. *Biomed*, 41(2):260-270. DOI: <https://doi.org/10.7705/biomedica.5409>
- Mamede, L. D., de Paula, K. G., de Oliveira, B., dos Santos, J. S. C., Cunha, L. M., Junior, M. C., Jung, L. R. C., Taranto, A. G., de Oliveira Lopes, D., & Leclercq, S. Y., 2020. Reverse and structural vaccinology approach to design a highly immunogenic multi-epitope subunit vaccine against *Streptococcus pneumoniae* infection. *Infection, Genetics and Evolution*, 85:104473. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MEEGID.2020.104473>
- Marques, P. H., Tiwari, S., Felice, A. G., Jaiswal, A. K., Aburjaile, F. F., Azevedo, V., Silva-Vergara, M. L., Ferreira-Paim, K., Soares, S. d. C., & Fonseca, F. M., 2024. Design of a multi-epitope vaccine against *Histoplasma capsulatum* through immunoinformatics approaches. *Journal of Fungi*, 10(1):43. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof10010043>
- Martínez-Cepeda, G. E. y Revelo-Ruales, A. P., 2017. Histoplasmosis en caninos y felinos: signos clínicos, métodos de diagnóstico y tratamiento. *Analecta Vet.* 37(1):45-58. DOI: <https://doi.org/10.24215/15142590e007>
- Mascola, J. R., & Fauci, A. S., 2019. Novel vaccine technologies for the 21st century. *Nature Reviews Immunology*, 20(2):87–88. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41577-019-0243-3>
- Mitkus, R. J., King, D. B., Hess, M. A., Forshee, R. A., & Walderhaug, M. O. ,2011. Updated aluminum pharmacokinetics following infant exposures through diet and vaccination. *Vaccine*, 29(51):9538–9543. <https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2011.09.124>
- Mittal, J., Ponce, M. G., Gendlina, I., Nosanchuk, J.D., 2019. *Histoplasma capsulatum*: mechanisms for pathogenesis. *Curr Top Microbiol Immunol*, 422:157-191. DOI: 10.1007/82_2018_114. PMID: 30043340; PMCID: PMC7212190.
- Nahian, M., Shahab, M., Khan, M. R., Akash, S., Banu, T. A., Sarkar, M. H., Goswami, B., Chowdhury, S. F., Islam, M. A., Abu Rus'd, A., Begum, S., Habib, A., Shaikh, A. A., Oliveira, J. I. N., Akter, S., 2025. Development of a broad-spectrum epitope-based vaccine against *Streptococcus pneumoniae*. *PLoS One*, 16; 20(1):e0317216. DOI: 10.1371/journal.pone.0317216
- Negahdaripour, M., Eslami, M., Nezafat, N., Hajjighahramani, N., Ghoshoon, M. B., Shoolian, E., Dehshahri, A., Erfani, N., Morowvat, M. H., & Ghasemi, Y., 2017. A novel HPV prophylactic peptide vaccine, designed by immunoinformatics and structural vaccinology approaches. *Infection, Genetics and Evolution*, 54:402–416. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.MEEGID.2017.08.002>

- Nemati, A. S., Tafrihi, M., Sheikhi, F., Tabari, A. R., & Haditabar, A., 2021. Designing a new multi epitope-based vaccine against COVID-19 disease: an immunoinformatic study based on reverse vaccinology approach. *Research Square*. DOI: <https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-206270/V1>
- Oli, A. N., Obialor, W. O., Ifeanyichukwu, M. O., Odimegwu, D. C., Okoyeh, J. N., Emechebe, G. O., Adejumo, S. A., & Ibeanu, G. C., 2020. Immunoinformatics and vaccine development: An overview. *ImmunoTargets and Therapy*, 9:13–30. DOI: <https://doi.org/10.2147/ITT.S241064>
- Oli, A. N., Rowaiye, A. B., 2022, Chapter 2 – “Vaccine types and reverse vaccinology”, Editor(s): Ashfield, R., Oli, A. N., Esimone, Ch., Anagu, L. In developments in immunology, vaccinology and methods in vaccine research, Academic Press, 31-55, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91146-7.00013-5>.
- Orozco, M. J. A., Ruíz, B. J. D., Agudelo, F. P. M., Pérez, G. J., 2021. *Factores de riesgo domiciliarios y seroprevalencia de leptospirosis canina en 39 municipios del departamento de Antioquia, Colombia 2018*. <http://hdl.handle.net/10946/5216>, consultado el 17/01/2025.
- Parvizpour, S., Pourseif, M. M., Razmara, J., Rafi, M. A., & Omid, Y., 2020. Epitope-based vaccine design: a comprehensive overview of bioinformatics approaches. *Drug Discovery Today*, 25(6):1034–1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.DRUDIS.2020.03.006>
- Patra, P., Mondal, N., Patra, B. C., & Bhattacharya, M., 2020. Epitope-based vaccine designing of *Nocardia asteroides* targeting the virulence factor mce-family protein by immunoinformatics approach. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 26(2):1165–1176. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10989-019-09921-4/FIGURES/9>
- Perea-Valle, P., Delgado-Aguirre, C. J., Villafuerte-Domínguez, B. G., & Río-Navarro, B. E. Del, 2022. Anafilaxia causada por vacunas. *Revista alergia México*, 69(Supl.1):1-14. <https://doi.org/10.29262/ram.v69isupl1.989>
- Pérez, G. G. F., Pinta, D., Luna, J., Mizhquero, E., 2023. Frecuencia de leptospirosis en pacientes caninos atendidos en el hospital docente veterinario César Augusto Guerrero. *Ciencias Vet Agrop*, 13(1):31-37. DOI: <https://doi.org/10.54753/cedamaz.v13i1.1282>
- Racle, J., Guillaume, P., Schmidt, J., Michaux, J., Larabi, A., Lau, K., Perez, M. A., Croce, G., Genolet, R., Coukos, G., Zoete, V., Pojer, F., Bassani-Sternberg, M., Harari, A., Gfeller, D., 2023. Machine learning predictions of MHC-II specificities reveal alternative binding mode of class II epitopes. *Immunity*, 56(6):1359-1375. e13, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.immuni.2023.03.009>
- Raoufi, E., Hemmati, M., Eftekhari, S., Khaksaran, K., Mahmodi, Z., Farajollahi, M. M., & Mohsenzadegan, M., 2020. Epitope prediction by novel immunoinformatics approach: A state-of-the-art review. *International Journal of Peptide Research and Therapeutics*, 26(2):1155–1163. DOI: <https://doi.org/10.1007/S10989-019-09918-Z/TABLES/3>

- Rappuoli, R., Bottomley, M. J., D'Oro, U., Finco, O., & de Gregorio, E., 2016. Reverse vaccinology 2.0: Human immunology instructs vaccine antigen design. *Journal of Experimental Medicine*, 213(4):469–481. DOI: <https://doi.org/10.1084/JEM.20151960>
- Rodríguez Domínguez, M., Montes de Oca Jiménez, R., Barbabosa-Pliego, A., Díaz-Aparicio, E., Varela Guerrero, J., & Tenorio Borroto, E., 2022. Isolation, cloning and phylogenetic analysis of PLD and CP40, virulence factors of a mexican isolate of *Corynebacterium pseudotuberculosis ovis*. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 25(2). DOI: <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.3768>
- Rodríguez-Domínguez, M.C., Montes-de-Oca-Jiménez, R., Vázquez-Chagoyán, J. C., Rivadeneira-Barreiro, P. E., Zambrano-Rodríguez, P. C., Ruiz-Riva-Palacio, M. E., Gutiérrez-Castillo, A. D. C., de-Castro-Soares, S., Vieyra-Reyes, P., Arteaga-Troncoso, G., 2023. Bioinformatic approach of B and T cell epitopes of PLD and CP40 proteins of *Corynebacterium pseudotuberculosis ovis* mexican isolate 2j-l towards a peptide-based vaccine. *Int J Mol Sci*, 25(1):270. DOI: 10.3390/ijms25010270. PMID: 38203441; PMCID: PMC10778833.
- Roth, J. A., 2011. Veterinary vaccines and their importance to animal health and public health. *Procedia in Vaccinology*, 5:127 – 136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.provac.2011.10.009>.
- Ryan, N., Pratiwi, S. E., Mardhia, M., Ysrafil, Y., Liana. D. F., Mahyarudin, M., 2024. Immunoinformatics approach for design novel multi-epitope prophylactic and therapeutic vaccine based on capsid proteins L1 and L2 and oncoproteins E6 and E7 of human papillomavirus 16 and human papillomavirus 18 against cervical cancer. *Osong Public Health Res Perspect*, 15(4):307-328. DOI: <https://doi.org/10.24171/j.phrp.2024.0013>.
- Sánchez-Trincado, J. L., Gómez-Perosanz, M., Reche, P. A., 2017. Fundamentals and methods for T- and B-cell epitope prediction. *Journal of Immunology Research*, DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/2680160>
- Savsani, K., Jabbour, G., & Dakshanamurthy, S., 2021. A New epitope selection method: application to design a multi-valent epitope vaccine targeting HRAS oncogene in squamous cell carcinoma. *Vaccines*, 10(1):63. DOI: <https://doi.org/10.3390/VACCINES10010063>
- SENASICA, Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2021. Brucelosis en animales. <https://www.gob.mx/senasica/acciones-y-programas/campana-nacional-contrala-brucelosis>, consultado 2/2/2025.
- Sharma, R., Rajput, V. S., Jamal, S., Grover, A., Grover, S., 2021. An immunoinformatics approach to design a multi-epitope vaccine against *Mycobacterium tuberculosis* exploiting secreted exosome proteins. *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93266-w>
- Soria-Guerra, R. E., Nieto-Gomez, R., Govea-Alonso, D. O., Rosales-Mendoza, S., 2015. An overview of bioinformatics tools for epitope prediction: Implications on vaccine development. *Journal of Biomedical Informatics*, 53:405–414. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JBI.2014.11.003>

- Soria-Guerra, R. E., Nieto-Gómez, R., Govea-Alonso, D. O., Rosales-Mendoza, S., 2015. An overview of bioinformatics tools for epitope prediction: implications on vaccine development. *J Biomed Informat*, 53:405-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2014.11.003>.
- Sunita, Sajid, A., Singh, Y., & Shukla, P., 2019. Computational tools for modern vaccine development. *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 16(3):723–735. DOI: <https://doi.org/10.1080/21645515.2019.1670035>
- Tizard, I. R. 2024, *Veterinary Immunology*. 11^a ed. Ed. Elsevier.
- Tomar, N., De, R.K., 2014. Immunoinformatics: A brief review. In: De, R., Tomar, N. (eds) *Immunoinformatics*. Methods in molecular biology, vol 1184. Humana Press, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1115-8_3
- Waheed, S., Bayas, A., Hindi, F., Rizvi, Z., Espinosa, P. S., & Bayas, A. S., 2021. Neurological complications of COVID-19: Guillain-Barre syndrome following Pfizer COVID-19 vaccine. *Cureus*, 13(2): e13426. DOI: 10.7759/cureus.13426
- WHO, World Health Organization, 2021. Vaccines and immunization: What is vaccination?. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/vaccines-and-immunization-what-is-vaccination>, consultado 4/12/2023.
- WHO, World Health Organization, 2013. Vaccine safety basics: learning manual. <https://iris.who.int/handle/10665/340576>, consultado 17/06/2025.
- Zafar, S., Ajab, H., Mughal, Z. un nisa, Ahmed zai, J., Baig, S., Baig, A., Habib, Z., Jamil, F., Ibrahim, M., Kanwal, S., & Asif Rasheed, M., 2022. Prediction and evaluation of multi epitope based sub-unit vaccine against *Salmonella typhimurium*. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(2):1092–1099. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2021.09.061>

Enfermedades zoonóticas transmitidas por perros

Yolanda Margarita Sánchez Castilleja¹,
Adrián Emmanuel Iglesias Reyes¹, Juan José Ortega Reyes²

Resumen. *Enfermedades parasitarias, bacterianas y víricas, son transmitidas a humanos por perros, causando en ambas especies signos y síntomas que en muchos casos pueden llegar a la muerte. Con el objetivo de realizar una revisión para aportar conocimiento sobre algunas enfermedades zoonóticas transmitidas por perros, se realizó una búsqueda bibliográfica en los servicios de información científica: Google académico, Medline, Redalyc, ScienceDirect, Scopus, Scirus y la biblioteca digital de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (BidiUAM). Las principales investigaciones refieren un aumento en la tenencia de mascotas, así como en el descuido y abandono, lo que se traduce en problemas de salud animal y pública. Destacan las elevadas prevalencias reportadas, lo que indica la importancia del conocimiento de las enfermedades zoonóticas para ejercer acciones de prevención, control y erradicación, donde participen todos los sectores de la salud pública, animal y de los ecosistemas a nivel local, nacional e internacional.*

Palabras clave: Zoonosis, Perros, Parásitos, Brucelosis, Leptospirosis, Rabia.

Abstract. *Parasitic, bacterial, and viral diseases are transmitted to humans by dogs, causing signs and symptoms in both species that can often lead to death. In order to conduct a review and contribute to knowledge about some zoonotic diseases transmitted by dogs, a bibliographic search was conducted using the following scientific information services: Google Scholar, Medline, Redalyc, ScienceDirect, Scopus, Scirus, and the digital library of the Autonomous Metropolitan University of Xochimilco (BidiUAM). The main research reports an increase in pet ownership, as well as in neglect and abandonment, which translates into animal and public health problems. The high reported prevalence rates are notable, indicating the impor-*

¹ Departamento de Producción Agrícola y Animal. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco. Correo electrónico: ymsanchez@correo.xoc.uam.mx

² Hospital Veterinario de la Ciudad de México.

tance of understanding zoonotic diseases for implementing prevention, control, and eradication actions, involving all sectors of public, animal, and ecosystem health at the local, national and international levels.

Key words: *Zoonosis, Dogs, Parasites, Brucellosis, Leptospirosis, Rabies.*

INTRODUCCIÓN

La presencia de los animales de compañía se ha incrementado en los últimos años; tan solo en Estados Unidos, se estimó una población de 89,7 millones de perros en 2023 (Statista, 2024) y, en Europa en el mismo año 106, 4 millones, lo que significó un aumento de 11,5 millones y 32,5 millones en un lapso de 10 años, respectivamente (Orús, 2024). Un estudio realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), demostró que 57 de cada 100 hogares mexicanos, tienen al menos una mascota y de éstos, en un 85% son perros, lo que representa la existencia de 43.8 millones de perros (INEGI, 2021; SEDEMA, 2023).

Sin duda, esto responde a que el perro se ha convertido en un integrante importante de la familia. Se le ha utilizado en actividades de caza, vigilancia y protección. Así mismo, como apoyo a nivel emocional, terapéutico, fisiológico e incluso, su participación búsqueda y rescate de posibles víctimas en desastres es bien reconocida (Dabanch, 2003; Gómez *et al.*, 2007; Mills, 2009; Hawes *et al.*, 2020). No obstante, en un comunicado emitido por el Congreso de la Ciudad de México (2021) se afirmó que en México son abandonados cerca de 500 mil perros anualmente, los cuales terminan en situación de calle. Esto, aunado a la tenencia irresponsable, que va desde la privación de un espacio adecuado (Cendón *et al.*, 2011), alimento, agua, baño (Ortega, 2001), hasta la falta de atención médico veterinario, puede representar un problema desde el punto de vista epidemiológico pues se dificulta el tener reportes y registros regulares sobre las enfermedades parasitarias, bacterianas y virales que están circulando, que afectan a la salud animal y, que en muchos casos pueden ser transmitidas al humano (Acha y Szyfres, 2003; Vega-Aragón, 2009). Éstas, conocidas como enfermedades zoonóticas, son de reporte obligatorio en México, no obstante, muchas de estas enfermedades son subdiagnosticadas y se consideran desatendidas, por lo que es importante capacitar al personal de salud para su identificación, diagnóstico y reporte ante las instancias correspondientes de la Secretaría de Salud y la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), de manera que se ejerzan las medidas de prevención, control y erradicación correspondientes. Por tal motivo, el objetivo de esta revisión es analizar y describir aspectos relevantes respecto a las enfermedades zoonóticas causadas por perros y su impacto en salud pública.

MÉTODO

Se realizó la búsqueda y recopilación de artículos científicos disponibles en bases de datos, tales como: *Google académico*, *Medline*, *Redalyc*, *ScienceDirect*, *Scopus*, *Scirus* y la biblioteca digital de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco (BidiUAM). Para la búsqueda se utilizaron las palabras clave: zoonosis, perros, parásitos, brucelosis, leptospirosis y rabia.

Zoonosis transmitidas por perros

Según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), se estima la existencia de 1,415 enfermedades en humanos, de las cuales, entre el 60 y 65% tienen su origen en los animales, no obstante se reconocen 200 zoonosis, de las cuales solo un pequeño porcentaje se asocian a perros (PRONABIVE, 2021; OMS, 2022; Sánchez-Montes, 2022; González, 2024) y, cuyos agentes patógenos son transmitidos de forma indirecta (Calvo y Arosemena, 2006) por contacto con sus excretas (*Ancylostoma caninum*, *Toxocara canis*), orina (*Leptospira* spp), saliva (virus de la rabia) fomites (*Brucella canis*) u otros fluidos, así como por vectores (*Dipylidium caninum*).

Zoonosis parasitarias

con base en estudios realizados en México, los parásitos de tipo zoonótico transmitidos por los perros *Ancylostoma caninum* (Torres-Chablé *et al.*, 2015; Contreras-Flores *et al.*, 2021; Lyons *et al.*, 2022; Hernández-Calva *et al.*, 2023; Olave Leyva *et al.*, 2023), *Toxocara canis* (Lara Reyes *et al.*, 2021) y *Dipylidium caninum* (Hernández Valdivia *et al.*, 2022) muestran elevadas prevalencias, representando un gran riesgo para la salud animal y pública.

Ancylostoma caninum, es un nemátodo que se transmite a cachorros vía transmamaria (Stone y Girardeau, 1968), por contacto directo con la piel (Granzer y Haas, 1991) o ingesta accidental de larvas que están en suelos (Epe, 2009) o en hospederos paraténicos (Matsusaki, 1951). El curso de la infección por *A. caninum* varía desde casos asintomáticos, hasta la presencia de signos como diarrea, vómito, deshidratación, anemia, mucosas pálidas, pérdida de peso e incluso la muerte del animal, especialmente el cachorro (Hawdon y Wise, 2021). La transmisión a humanos se da por contacto con las larvas de vida libre, a través de la piel o por la ingestión de larvas etapa L3, causando enteritis eosinofílica, que se caracteriza por lesión en mucosa, con el consecuente dolor abdominal agudo (Ngcamphalala *et al.*, 2020; Marsh y Lakritz, 2023).

El parásito se reporta con elevadas prevalencias en los estados de Tabasco (Torres-Chablé *et al.*, 2015), Puebla (Contreras-Flores *et al.*, 2021), Quintana Roo (Lyons *et al.*, 2022), Tlaxcala (Hernández-Calva *et al.*, 2023), Hidalgo (Olave Leyva *et al.*, 2023), identificando factores de riesgo como, el acceso a las calles, la falta de limpieza y la tenencia irresponsable de propietarios. En tanto, en Canadá, se notifica un aumento en el número de casos, pero éste debido a la importación de animales infectados y a la falta de eficacia de antiparasitarios (Nezami *et al.*, 2023; Jiménez, 2024); de manera que es evidente que se debe tener especial cuidado en el diagnóstico y tratamiento bien dirigidos, previo al desplazamiento de animales, lo que evitará la introducción de agentes infecciosos a otros países.

Toxocara canis, afecta mayoritariamente a cachorros, quienes se infectan a través del saco gestacional y/o la leche o por la ingestión de huevos (en ambiente) o larvas de un hospedador paraténico (Lee *et al.*, 2014). La migración larval puede causar retraso en el crecimiento y desórdenes digestivos y en infecciones severas puede causar taquipnea, tos y rinorrea. Miller (2020) menciona que, ocasionalmente se pueden presentar lesiones de órganos tales como el pulmón, hígado o manifestaciones nerviosas inespecíficas que conducen a la muerte del cachorro. En humanos, la infección ocurre de manera accidental al ingerir huevos o larvas de *T. canis* que se encuentran en parques públicos, jardines, pisos y vegetales regados con agua de riego contaminada con los huevos de *T. canis* excretados por el perro. *T. canis* podría tener un papel en cuadros de urticaria crónica; pero la forma más grave de esta infección es la ocular, ya que puede provocar granuloma periférico y del polo posterior, disminución de la agudeza visual o ceguera unilateral por efecto del desprendimiento de retina, la inflamación aguda de la retina, nervio óptico y uvea, entre otros (Morocoima *et al.*, 2021) Este parásito, según Hotez y Wilkins (2009), afecta principalmente a la población infantil, debido a su costumbre de llevarse a la boca las manos y distintos objetos sucios con tierra.

Investigaciones realizadas por Martínez-Barbabosa *et al.* (2008), demuestran la presencia de huevos de *T. canis* en heces recolectadas de calles, camellones y parques, no obstante, Romero *et al.* (2009) identificaron elevados porcentajes de perros domiciliarios parasitados. Estos resultados deben llamar la atención de aquellos que tienen la responsabilidad de recolectar las heces tanto en el interior como en el exterior de los hogares, pues, un perro, dependiendo de su edad, pueden producir entre 15 mil y 200 mil huevos al día, mismos que al ser evacuados representan una fuente de contaminación importante (Rojas-Salamanca *et al.*, 2016).

Dipylidium caninum, es un cestodo común en perros y gatos que, ocasionalmente afecta al humano. Su transmisión involucra un animal intermediario invertebrado, ya sean pulgas o piojos, en los que se desarrolla un cisticercoide, siendo éste la forma infectiva larval. Éste, después de ser ingerido por perros o gatos e incluso el humano, quienes actúan como huéspedes definitivos, alcanza su madurez en el intestino y, al cabo de 2 a 3 semanas se elimina por las heces en forma de proglótidos (Martínez-Barbabosa *et al.*, 2014; US Centers for Disease Control and Prevention, 2019; Nayaran *et al.*, 2024). Los perros infectados generalmente no muestran signos, sin embargo, Dasharath *et al.* (2024) y Niki-

tan y Melnychuk, (2024) identificaron en algunos individuos, la presencia de proglótidos en heces, pulgas en su pelaje y, signos como prurito anal y letargia. Pese a que la infección en humanos es rara y cursa de manera asintomática, se reconoce que el grupo de mayor riesgo son los infantes y niños, quienes pueden presentar proglótidos en heces y pañales, además de otros signos, como dolor abdominal, diarrea, prurito en área perianal, pérdida de apetito y peso, entre otros (Portokalidou *et al.*, 2019; Chong *et al.*, 2020; Gutema *et al.*, 2021), aunque éstos, según afirma Rousseau *et al.* (2022), son inespecíficos, dificultando tanto el diagnóstico como el tratamiento. Por otra parte, se identifican como las poblaciones caninas más susceptibles los cachorros y perros con mala condición corporal (Hernández *et al.*, 2022). En México, se reportan positivities entre 2.3 y 60%, encontrando como factores de riesgo la falta de control parasitario y los cambios de temperatura, con mayor incidencia en la época más fría del año, pues los animales callejeros, en busca de refugio, tienden a congregarse, facilitando la propagación de vectores (Eguía-Aguilar *et al.*, 2005; Cantó *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2022).

Diversos estudios informan coexistencia de dos o más parásitos en perros infectados, siendo la más frecuente, entre *T. canis*, *Ancylostoma* y *Cryptosporidium* spp (Insulander *et al.*, 2013; Martínez Barbabosa *et al.*, 2015; Olave Leyva *et al.*, 2023), este último merece especial importancia pues compromete la salud e incluso la vida de personas desnutridas o con SIDA (Insulander *et al.*, 2013). Fontanarrosa *et al.* (2006) y Ugbomoiko *et al.* (2008) explican que las parasitosis múltiples, se dan más por la carga parasitaria, qué por la presencia de otras especies de parásitos, por otra parte, es un buen indicativo de las especies parasitarias circulantes y, que representan riesgo tanto en salud animal como pública, lo que, según Martínez Barbabosa *et al.* (2015), permite el establecimiento de un tratamiento farmacológico combinado.

Zoonosis bacterianas

Son pocos los referentes a enfermedades bacterianas transmitidas por perros; sin embargo, deben llamar la atención, agentes como *Brucella canis* y *Leptospira* sp. Dichas bacterias, causantes de enfermedades zoonóticas, se les considera enfermedades ocupacionales, pues afectan, en su mayoría, personas relacionadas con clínicas, laboratorios, criaderos, perreras, estéticas, entre otros (Tuemmers *et al.*, 2011; Ridzuan *et al.*, 2016; Yantorno, 2018; Hernández-Ramírez *et al.*, 2020; Laverde *et al.*, 2021).

El género *Brucella*, posee varias especies, entre ellas, *B. abortus*, *B. melitensis* y *B. suis*. Éstas pueden infectar de manera ocasional al perro; sin embargo, *B. canis* es el principal agente causante de la brucelosis canina (Schiavo *et al.*, 2024). La viabilidad de ese agente, le permite sobrevivir y persistir a temperaturas bajas, principalmente cuando se encuentra por debajo del punto de congelación y en ambientes con humedad moderada y pH neutro. No obstante, se considera termosensible debido a que no sobrevive a temperaturas superiores de 60 °C (Castro *et al.*, 2005). El contagio de *Brucella* en

caninos ocurre por el contacto con el producto del aborto, tejidos placentarios contaminados, secreciones vaginales, semen de animales infectados, orina (Borie-Polanco, 2005) e incluso, según Di Lorenzo y Olivera (2008), a través de la leche secretada por perras. El curso es generalmente asintomático, sin embargo, Sebzda y Kauffman (2023) mencionan que se pueden presentar signos como letargo, pérdida de peso y condición corporal, disminución del líbido, pelaje hisurto, linfadenitis generalizada, falla reproductiva e infertilidad y, en machos, dermatitis escrotal, orquitis, epididimitis con la consecuente infertilidad (Briseño *et al.*, 2004; Ardoino *et al.*, 2006).

Debido a que es una zoonosis, el humano es susceptible al contagio, al estar en constante contacto con esos animales, sus secreciones o fomites. De acuerdo a los hallazgos de diversos autores, el hospedero sufre fiebre, debilidad, murmullo cardíaco, vegetaciones aórticas, insuficiencia aórtica severa, dolor de articulaciones, adenomegalia, esplenomegalia y pérdida de peso (Ardoino *et al.*, 2006; Yantorno, 2018; Laverde *et al.*, 2021).

Estudios en poblaciones de perros muestran en países como Argentina seroprevalencias de 7.3% a 18.2% (Boeri *et al.*, 2008; Ricardo *et al.*, 2024), siendo la positividad más frecuente en animales ferales. En Perú los datos indican un porcentaje de 15.6 ± 3.3 (Ramírez *et al.*, 2006), en Colombia 2.76% a 7.5% (Agudelo-Florez *et al.*, 2012) y en México se han reportado seroprevalencias del 42.8% en perros con problemas reproductivos, sin embargo por hemocultivo sólo se detectó un 5.3%, lo cual, explican, puede obedecer a reacciones inespecíficas en la serología o a la intermitencia de la bacteremia en el momento del análisis (Carmichael y Joubert, 1987; Briseño, 2004).

Hasta el presente, no existe vacuna contra la brucelosis para personas o perros, por lo que es importante la prevención primaria basada en medidas de limpieza y desinfección de instalaciones, equipos, materiales, así como el uso de material de bioseguridad para el personal en riesgo, es decir, aquel que está en contacto con los animales (Tuemmers *et al.*, 2011).

La leptospirosis, por su parte, es una enfermedad producida por la bacteria del género *Leptospira* (Sykes *et al.*, 2022). El perro es reservorio primario de *Leptospira interrogans* serovar *Canicola*, no obstante, diversos autores han identificado los serogrupos *Icterohaemorrhagiae*, *Grippityphosa*, *Pomona*, *Pyrogenes*, *Panama*, *Hebdomadis*, *Shermani*, *Bataviae*, *Ballum*, *Javanica*, *Australis* serovariedad *Bratislava*, *Sejroe* serovariedad *Hardjo* (*Hardjobovis*) y *Wolffi* (Goh *et al.*, 2019; Hernández-Ramírez *et al.*, 2020; Ricardo *et al.*, 2020; Orozco *et al.*, 2021; Pérez *et al.*, 2023); pero, en su mayoría se consideran de transmisión accidental (Ellis, 2015).

Kurilung *et al.* (2017) y Serrano-Martínez *et al.* (2020), indican que la bacteria *Leptospira* spp necesita en general, temperaturas cálidas y alto grado de humedad para sobrevivir en el ambiente. Los microorganismos mueren por deshidratación o a temperaturas superiores a los 50°C. Pueden permanecer viables de unas pocas a varias semanas o meses en tierra contaminada. Las zonas con pobres condiciones sanitarias (Hernández *et al.*, 2017), así como las áreas periurbanas y refugios, se consideran factores de riesgo, pues muestran tasas de infección del 75% y del 11.5 al 80.4% respectivamente (Scialfa,

2021). En otros estudios, la presencia de los agentes se asocia a las fuertes lluvias e inundaciones (Wahab, 2018; Martin, 2023) o de agua contaminada con orina de animales infectados, ya sea que ésta sea de desagüe o regadío o que se encuentre contenida en depósitos o tambos (Siuce *et al.*, 2015; Hernández *et al.*, 2017; Goh *et al.*, 2019).

Las bacterias pueden transmitirse a los perros directamente o bien a través de agua, alimentos y suelos contaminados con orina de animales infectados asintomáticos, principalmente roedores. Estas penetran las mucosas oral, conjuntival o urogenital, el revestimiento suave de la nariz o heridas en piel del animal. Posteriormente, invaden el torrente sanguíneo produciendo bacteremia, invadiendo diversos órganos, entre los que se encuentran los pulmones, riñones, hígado y bazo. Se han identificado algunos factores que pueden incrementar la susceptibilidad a padecer la enfermedad, estos son, animales machos y edad de entre 4 y 11 años (Siuce *et al.*, 2015; Murcia *et al.*, 2020; Ricardo *et al.*, 2020), aunque otros autores, como Arrieta-Bernate *et al.* (2016), no han encontrado diferencias significativas entre los factores raza, sexo y edad.

La enfermedad cursa generalmente de forma subclínica, sin embargo, en algunos casos y después de un periodo de incubación de 8 a 25 días, con un promedio de 12 días, los perros pueden presentar signos que incluyen vómitos, diarrea, anorexia, orina oscura, letargo, deshidratación, hipotermia, congestión de las mucosas, dolor sublumbar (Luna *et al.*, 2008) y fiebre en un bajo porcentaje de los casos (11%) (Luna, 1997; Luna *et al.*, 2001). Se documenta que algunos caninos asintomáticos, incluso, pueden presentar muerte súbita entre el tercero y sexto día. La literatura refiere que los signos varían dependiendo la serovariedad presente, esto es, la nefritis intersticial crónica se asocia a la serovariedad Canícola, en tanto signos como hemorragias, ictericia y anemia, así como la afectación del hígado y riñón se relacionan con la presencia de las serovariedades *Icterohaemorrhagiae* y *Grippytyphosa* respectivamente (The Center for Food Security and Public Health, 2005; Luna *et al.*, 2008; Arrieta-Bernate *et al.*, 2016; Martin, 2023; Sykes *et al.*, 2023).

Los microorganismos, se transmiten al hombre por ingestión de agua y alimento contaminado con orina o por contacto directo con la piel (Luna *et al.*, 2008). Se ha demostrado la presencia de las serovariedades Canícola, *Icterohaemorrhagiae*, *Pyrogenes*, *Autumnal Narayis*, *Pomona* en personas con fiebre, granuloma hepático, hepato-esplenomegalia y endocarditis (Hernández-Ramírez *et al.*, 2020).

Estudios evidencian que los agentes son un problema actual y mundial, por el cual se deben reforzar las acciones de prevención, más allá del tratamiento basado en antibióticos. Resultan alarmantes las seropositividades encontradas en países como Malasia donde se reporta un aumento de casos que van de 263 en 2004 a 5 370 en 2015 (Wahab, 2018), 58% en 305 perros evaluados en la ciudad de Lima Perú (Siuce *et al.*, 2015), 54.10% (33/61) en Colombia, 28.44% en la Ciudad México (Moles *et al.*, 1990), así como seroprevalencias que van del 41.5% al 48.4% en Toluca, Estado de México (García e Ibarra, 1992; Luna, 1993) y, más recientemente, un 9% (15/165) identificado en el norte del país (Culiacán, Sinaloa) (Hernández *et al.*, 2017). Por lo anterior, es importante diseñar programas de vacunación, previo a un

estudio de las serovariedades existentes, iniciando con la vacunación de cachorros de 6 a 9 semanas, con dos dosis a intervalos de 4 semanas y revacunaciones anuales, además de ejercer acciones encaminadas a la higiene, uso de material de protección por parte de personas en riesgo y el evitar el contacto con orina animal, lo que contribuirá a disminuir la probabilidad de infección (Goh *et al.*, 2019).

Zoonosis viral

La rabia, por su parte, es una enfermedad ocasionada por un virus de la familia *Rhabdoviridae* que afecta a todos los mamíferos domésticos o silvestres, e incluso al humano, con una letalidad cercana al 100%. Esta se transmite por contacto directo con la saliva o mucosas que contienen el virus (rabv) (Fatima *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2023).

El rabv está presente en la saliva y el cerebro de los animales infectados, siendo la saliva su principal modo de transmisión. Tras la mordedura del animal infectado, el virus comienza su replicación cerca del sitio de inoculación y una vez que ha alcanzado una concentración infectiva, se moviliza a los husos neuromusculares hasta llegar a las placas terminales motoras y a través del sistema nervioso periférico, se propaga al sistema nervioso central, donde el virus alcanza la médula espinal ascendiendo rápidamente al diencéfalo, hipocampo y tronco encefálico. Posteriormente, el virus se propaga a través de los nervios autónomos a las glándulas salivales, donde se acumula y aumenta su número facilitando su transmisión por mordeduras del mamífero infectado (Brunker y Mollentze, 2018; Arsuaga *et al.*, 2024; Karunathna *et al.*, 2024).

Debido a que la tasa de propagación del virus, hasta alcanzar la médula espinal, es de 10-50 mm por día, su periodo de incubación varía de acuerdo a la distancia del sitio de inoculación viral y el SNC, pudiendo ser de varios días, meses o hasta años (cuatro a seis años), sin embargo, una vez que aparecen los síntomas de la enfermedad tiene una letalidad cercana al 100% (Shengli, 2021; Alfaro, 2023).

De acuerdo a lo descrito por algunos investigadores (Thiravat *et al.*, 2013; Bintang *et al.*, 2023; Arsuaga *et al.*, 2024), la fase prodrómica se inicia de uno a tres meses después la exposición, en un 60% de los casos. Los signos son inespecíficos y pueden incluir fiebre, dolor o calambres en la zona de la mordedura, dolor de cabeza, inquietud, y prurito. Tras avanzar la enfermedad los síntomas evolucionan a manifestaciones de origen neurológico (2-7 días) como ansiedad, agresividad, confusión, agitación, hiperactividad, insomnio, aumento de reflejos tendinosos profundos, fotosensibilidad, hipoacusia, delirios, alucinaciones, parálisis leves, rigidez de nuca, taquicardia, exceso de salivación, espasmos faríngeos, sed, convulsiones y a los 14 días aproximadamente continúan con coma, que finalmente ocasiona la muerte del paciente por paro respiratorio o arritmias severas.

A nivel mundial, se reportan alrededor de 59,000 muertes anualmente a causa del mencionado virus, en el caso particular de África, se registran 24,000, en tanto en Asia se estima que cada 15 minutos

muere una persona por esta causa, con la probabilidad de que en un 15% de los casos, sean niños menores de 15 años. En contraste; se encuentra Europa, donde no se reportan casos de rabia en humanos debido a sus fuertes políticas de vacunación en animales (Borse *et al.*, 2018; Raux *et al.*, 2000; Bourhy *et al.*, 2005; WHO, 2021).

En México el Programa Nacional de Control de la Rabia logró reducir de 69 casos reportados en 1990 a solo tres casos en el 2006. No fue sino hasta el año 2019 cuando se obtuvo la validación por parte de la OMS como país libre de casos de rabia canina (Ortega y Jiménez, 2017; Gutiérrez *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2023). Recientemente, en 2022, se detectó en el estado de Nayarit, un caso de rabia en humano que fue transmitido por un gato sin antecedentes de vacunación y tres casos más en los estados de Jalisco y Oaxaca, por mordedura de murciélago; en 2023, fue confirmado un caso de rabia canina en el estado de Sonora, aplicándose profilaxis a 9 personas que estuvieron en contacto con el ejemplar y, en el 2024 se confirmó un caso en perro y dos casos de rabia humana, el primero transmitido por un felino urbano y, el segundo por un mamífero silvestre (Torres *et al.*, 2023; Secretaria de Salud, 2024). Todos estos casos se notificaron de forma inmediata al Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (SiNaVE).

A pesar de que el mejor tratamiento de la rabia es de forma profiláctica (vacunas e inmunoglobulinas antirrábica), la invasión por parte del ser humano a hábitats donde circula el virus de forma natural, el incremento de la población de murciélagos y perros que deambulan sin control en las calles, han provocado un aumento en el número de casos de rabv de animales domésticos y humanos, manteniendo a esta enfermedad como un problema de salud pública (Ortega y Jiménez, 2017; Yaguana y López, 2017; Frantchez y Medina, 2018).

Es necesario que el gobierno a través de políticas públicas sumen esfuerzos en conjunto con la medicina humana, veterinaria y población en general para poder mantener la vigilancia epidemiológica, control de la población de especies domésticas potenciales transmisores y aplicación de medidas profilácticas en humanos para disminuir la propagación, principalmente en infantes menores de 15 años, ya que son estos el principal grupo expuesto a padecer rabia (Sánchez *et al.*, 2019; Secretaria de Salud, 2024).

Una Sola Salud

La relación hombre-animal es resultado del origen mismo del hombre y de su evolución. La domesticación de los animales y su utilización como bienes o servicios determinan el tipo de zoonosis prevaliente en cada comunidad y región. Este tipo de enfermedades posee un carácter dinámico al estar moduladas por cambios tecnológicos, económicos, sociales, demográficos y biológico-ambientales que plantean un serio desafío para su control y requieren de una estrategia integrada, donde la vigilan-

cia epidemiológica y epizootiológica, con el enfoque de salud ambiental, juega un papel fundamental (WHO, 2022; WHO, 2023).

El trabajo multi y transdisciplinario colaborativo entre los diversos organismos y sectores de la salud de las personas, los animales y de los ecosistemas a nivel local, nacional e internacional, permite abordar el riesgo de enfermedades en los puntos de contacto entre ellos, así como elaborar y poner en marcha políticas, leyes y reglamentos con el objetivo de mantener o mejorar la salud pública, lo que constituye la visión de “Una Sola Salud” (Patz *et al.*, 2004; Arévalo, 2020; WHO, 2022; WHO, 2023).

CONCLUSIÓN

Actualmente las mascotas y, especialmente los perros, tienen un papel importante en el entorno familiar, sin embargo, el compromiso adquirido, en un gran porcentaje no es cumplido, ya sea por descuido o abandono. Esta situación puede generar problemas de salud en el perro y en personas con los que tengan contacto.

Una considerable cantidad de enfermedades parasitarias, bacterianas y virales son transmitidas por perros y, el conocimiento de éstas, sus manifestaciones clínicas, distribución y el impacto en la salud pública, contribuyen a identificar posibles casos, de tal forma que los diversos sectores involucrados en salud implementen medidas de control y prevención de las enfermedades.

Es indiscutible la importancia que tiene la concientización de una tenencia responsable, en la que se fomente el cuidado integral de la mascota, en cuanto al ambiente, alimentación y salud, lo que incluye la higiene, desparasitación y vacunación oportuna de los caninos. Estas acciones constituyen el nivel de prevención primario más importante para la conservación de la salud animal y pública.

BIBLIOGRAFÍA

- Acha, P., Szyfres, B. (2003). *Zoonosis y enfermedades transmisibles comunes al hombre y a los animales, Volumen II Clamidiosis, rickettsiosis y virosis*. Organización Panamericana de la Salud, Washington DC, EUA. pp. 351– 361.
- Agudelo-Florez, P., Castro, B., Rojo-Ospina, R., Henao-Villegas, S. (2012). Seroprevalencia y factores de riesgo para brucelosis canina en perros domésticos de once comunas de la ciudad de Medellín, Colombia. *Revista de Salud Pública*, 14(4), 644– 656.
- Alfaro, M. R. (2023). Virología molecular de la rabia: un enfoque clínico. *Revista Cubana de Medicina Tropical*, 75(1), 1–19.
- Ardoino, S. M., Baruta, D. A., Toso, R. E. (2017). Brucelosis canina. *Ciencia Veterinaria*, 8(1), 50–61.
- Arévalo, D. C. S., Hernández, A. F. V. (2020). Salud publica veterinaria bajo el enfoque de una salud, el elemento integrador de políticas y estrategias para la seguridad alimentaria, inocuidad y el desarrollo rural. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias – FAGROPEC*, 12(1), 66–75.
- Arrieta-Bernate, G., Calderón-Rangel, A., Rodríguez, V., Álvarez, J. y Mattar-V, S. (2016). Presencia de anticuerpos contra *Leptospira interrogans* (sensu lato) en caninos semidomésticos en Sincelejo, Sucre (Colombia). *Veterinaria y Zootecnia*, 10(1), 89–103.
- Arsuaga, M., Miguel, B. R., Díaz-Menéndez, M. (2024). Rabies: Epidemiological update and pre- and post- exposure management. *Medicina Clínica*, 162, 542– 548.
- Bintang, A. K., Basri, M. I., Lotisna, M., Carrey, M. (2023). Rabies: Diagnostic, treatment, and prevention, *Nusantara Medical Sci J*, 1–13.
- Boeri, E., Escobar, G.I., Ayala, S. M., Sosa-Estani, S., Lucero, N. E. (2008). Brucelosis canina en perros de la ciudad de Buenos Aires, *Medicina (Buenos Aires)*, 68, 291–297.
- Borie-Polanco, C. (2005). Infertilidad canina por *Brucella canis*. En: Olivera, M., Gobelo, C., (Eds). *El Libro Latinoamericano de Reproducción canina y felina*. Biogénesis (Colombia), 249–265.
- Borse, R. H., Atkins, C. Y., Gambhir, M., Undurraga, E. A., Blanton, J. D., Kahn, E. B., Dyer, J. L., Rupprecht, C. E., Meltzer, M. I. (2018). Cost-effectiveness of dog rabies vaccination programs in East Africa. *PLoS neglected tropical diseases*, 12(5), e0006490
- Bourhy, H., Dacheux, L., Strady, C., Mailles, A. (2005). Rabies in Europe in 2005. *Eurosurveillance*, 10(11), 3–4.
- Briseño, G. H., Páramo, R. R. M., Flores, C. R., Suárez-Güemes, F., 2004, “Problemas reproductivos en perros machos infectados con *Brucella canis*”, *Vet Méx*, 35(2), 121–128.
- Brunker, K., Mollentze, N. (2018). “Rabies virus”, *Trends in microbiology*, 26(10), 886–887.
- Calvo, T. M., Arosemena, A. E. (2006). Zoonosis más importantes en perros. https://www.researchgate.net/publication/238723883_ZOONOSIS_MAS_IMPORTANTES_EN_PERROS, consultado el 16/01/2025.

- Cantó, G. J., García, M. P., García, A., Guerrero, M. J., Mosqueda, J. (2011). The prevalence and abundance of helminthes parasites in spray dogs from the city of Queretaro in central Mexico, *Journal of Helminthology*, 85(3), 263–269.
- Carmichael, L. E., Joubert, J. C. A. (1987). Rapid slide agglutination test for the serodiagnosis of *Brucella canis* infection that employs a variant (M-) organism as antigen. *Cornell Veterinarian*, 77, 3–12.
- Castro, H. A., González, S. R., Prat, M. I. (2005). Brucelosis: una revisión práctica. *Acta Bioquím Clín Latinoam.* 39(2), 203–216.
- Cendón, P.M, Holm, A., Balague, E.J. (2011). *Abandono de Animales de Compañía. Universidad Autónoma de Barcelona. Deontología y Veterinaria Legal.* 2011,1–22.
- Congreso de la Ciudad de México. (2021). *Iniciativa con proyecto de decreto por el que se adiciona un artículo al código penal para el Distrito Federal, en materia de abandono animal.* Disponible en <https://www.congresocdmx.gob.mx/media/documentos/10614da616026d42c4f3eb1049722bddd1f1d7ab.pdf>, consultado el 16/01/2025.
- Contreras-Flores, A., Romero-Castañón, S., Rocha, R. V. (2021). Gastrointestinal parasites in dog feces in Puebla City. Mexico. *Journal of Advanced Parasitology*, 8. 10.17582/journal.jap/2021/8.3.26.31.
- Dabanch, P. J. (2003). Zoonosis. *Revista chilena de infectología.* 20(Supl. 1), 47-51.
- Dasharath, S., Neha, R. Aditya, S., Om, P., Sunant, R. (2024). Successful treatment of a doberman dog infected with *Dipylidium caninum*. *Indian J Vet Sci & Biotechnol*, 20(2),134.
- Di Lorenzo, C., Olivera, M. (2008). Aislamiento de *Brucella canis* de leche de hembra canina infectada crónicamente. En: *XXI Congreso Panamericano de Ciencias Veterinarias (PANVET)*, Guadalajara, México.
- Eguía-Aguilar, P., Cruz-Reyes, A., Martínez-Maya, J. (2005). Ecological analysis and description of the intestinal helminths presents in dogs in Mexico City. *Vet Parasitol*, 127(2),139–146.
- Ellis, W. A. (2015). Animal leptospirosis. *Curr Top Microbiol Immunol.* 387, 99–137.
- Epe, C. (2009). Intestinal nematodes: biology and control. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 39,1091–107.
- Fatima, M., Iqbal, T., Shaheen, L., Salma, U., Siddique, R., Ali, R., Rehman, A. U., Usman, S. (2023). Transmission dynamics of rabies virus. In: Aguilar-Marcelino, L., Zafar, M. A., Abbas, R. Z., Khan, A. (Eds.), *Zoonosis*, Unique Scientific Publishers, Faisalabad, Pakistan, Vol 3: 386–397.
- Fontanarrosa, M. F., Vezzani, D., Basabe, J., Eiras, D. F. (2006). An epidemiological study of gastrointestinal parasites of dogs from Southern Greater, Buenos Aires (Argentina): Age, gender, breed, mixed infections, and seasonal and spatial patterns, *Vet Parasitol*,136(3–4), 283–295.
- Frantchez, V., Medina, J. (2018). Rabia: 99.9% mortal, 100% prevenible. *Rev Méd Urug*, 34(3), 164–171.

- García, S. C. M., Ibarra, Z. S. (1992). *Estudio serológico de leptospirosis canina en la ciudad de Toluca*. Tesis para optar por la licenciatura en MVZ. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UAEM, Toluca, México.
- Goh, S. H., Ismail, R., Lau, S. F., Megat, A. R., P. A., Mohd, M. T. B., Daud, F., Bahaman, A. R., Khairani-Bejo, S., Radzi, R., Khor, K. H. (2019). Risk factors and prediction of leptospiral seropositivity among dogs and dog handlers in Malaysia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(9), 1499.
- Gómez, G. L., Atehortua, H. C., Orozco, P. S. (2007). La influencia de las mascotas en la vida humana. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20, 377–386.
- González, S. A. (2024). Día mundial de la zoonosis: la importancia del bienestar y salud animal. Disponible en <https://www.fao.org/americas/opinion/detail/dia-mundial-zoonosis/es>, consultado el 17/01/2025.
- Granzer, M., Haas, W. (1991). Host-finding and host recognition of infective *Ancylostoma caninum* larvae, *International Journal for Parasitology*, 21, 429–40.
- Gutema, F. D., Yohannes, G. W., Abdi, R. D., Abuna, F., Ayana, D., Waktole, H., Amenu, K., Hiko, A., Agga, G. E. (2021). *Dipylidium caninum* infection in dogs and humans in Bishoftu Town, Ethiopia, *Diseases*, 9(1), 1.
- Gutiérrez, C. V., Chávez, F. I. A., Fernández, C. J. R., Rodríguez, M. J. D., Navarro, A. O., Gómez, M. J. I. (2021). *Programa de acción específico de prevención y control de enfermedades zoonóticas y emergentes*. Secretaría de Salud. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/738300/PAE_Zoonosis.pdf, consultado 6/04/25.
- Hawdon, J. M., Wise, K. A. (2021). *Ancylostoma caninum* and other canine hookworms. In: Strube, C., Mehlhorn, H., (Eds.) Dog Parasites Endangering Human Health. *Parasitology Research Monographs*, vol 13. Springer, Cham.
- Hawes, M. S, Kerrigan, M. J, Hupe, T, Morris, N. K. (2020). Factors informing the return of adopted dogs and cats to an animal shelter, *Animals*, 10(9), 1573.
- Hernández Ramírez, C. V., Gaxiola Camacho, S. M., Osuna Ramírez, I., Enríquez Verdugo, I., Castro del Campo, N., y López Moreno, H. S. (2017). Prevalence and risk factors associated with serovars of *Leptospira* in dogs from Culiacan, Sinaloa. *Vet México*, 4(2).
- Hernández-Calva, M., Villalobos-Peñalosa, L., Cortés-Roldán, P., Montalvo-Aguilar, G., Galaviz-Rodríguez, R. (2023). Determinación de los principales parásitos intestinales en perros de unidades habitacionales y parques en Apizaco, Tlaxcala, México. *Revista Científica de la Facultad de Veterinaria*, 33 (1). 10.52973/rcfcv-e33175
- Hernández-Ramírez, C., Gaxiola-Camacho, S., Enríquez-Verdugo, I., Rivas-Llamas, R., Osuna-Ramírez, I. (2020). Serovariedades de *Leptospira* y riesgos de contagio en humanos y perros de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, México. *Abanico Vet*, 10:1–16.

- Hernández-Valdivia, E., Martínez-Robles, J. D., Valdivia-Flores, A. G., Cruz-Vázquez, C., Ortiz-Martínez, R., Quezada-Tristán, T. (2022). Prevalencia de parásitos digestivos de perros del centro de México. *Revista MVZ Córdoba*, 27(3), e11.
- Hotez, P. J., Wilkins, P. P. (2009). Toxocariosis: America's most common neglected infection of poverty and a helminthiasis of global importance? *PLoS Negl Trop Dis*, 3(3), e400.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Encuesta Nacional de Bienestar Autorreportado (ENBIARE) 2021*. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia/7021>, consultado el 24/03/2025.
- Insulander, M., Silverlas, C., Lebbas, L., Karlsson, L., Mattsson, J. G., Svenungsson, B., (2013). Molecular epidemiology and clinical manifestations of human cryptosporidiosis in Sweden. *Epidemiol Infect*, 141,1009–1020.
- Jiménez, C. P. D. (2024). Anthelmintic resistance in the canine hookworm, *Ancylostoma caninum*. *Companion Animal*, 29(9).
- Karynarathna, I., Gunawardana, K., Aluthge, P. Gunasena, P. Gunathilake, S. Hapuarachchi, T. Rajapaksha, S., Ekanayake, U., Alvis, K. (2024). Rabies: pathophysiology, diagnosis, and management of a fatal zoonotic disease, 10.13140/RG.2.2.36108.12168.
- Kumar, A., Bhatt, S., Kumar, A., Rana, T. (2023). Canine rabies: An epidemiological significance, pathogenesis, diagnosis, prevention, and public health issues. *Comp Immunol Microbiol Infect Dis*, 97, 101992.
- Kurilung, A., Chanchaithong, P., Lugsomya, K., Niyomtham, W., Wuthiekanun, V., Prapasarakul, N. (2017). Molecular detection and isolation of pathogenic *Leptospira* from asymptomatic humans, domestic animals and water sources in Nan province, a rural area of Thailand. *Res Vet Sci*, 115,146-154.
- Lara-Reyes, E., Quijano-Hernández, I. A., Rodríguez-Vivas, R. I., Del Ángel-Caraza, J., Martínez-Castañeda, J. S. (2021). Factores asociados con la presencia de endoparásitos y ectoparásitos en perros domiciliados de la zona metropolitana de Toluca, México. *Biomédica*, 41(4), 756–772.
- Laverde, A. J., Restrepo-Botero, D., Hernández-Pulido, D., Rodríguez-Bautista, J. L., Sandoval I. S. (2021). Seroprevalencia de *Brucella canis* en perros de un refugio para animales de compañía en Bogotá, Colombia. *Biomed*, 41(2), 260–270.
- Lee, R. M., Moore, L. B., Bottazzi, M. E., Hotez, P. J. (2014). Toxocariasis in North America: a systematic review. *PLoS neglected tropical diseases*, 8(8), e3116.
- Luna, A. M. A., Moles, C. L. P., Torres, B. J. I., Nava, V.C. y Urrutia, V. R. M. (2001). Observaciones en el diagnóstico serológico de leptospirosis canina considerando la presencia de ictericia en sueros. *XXXVII Reunión Nacional de Investigación Pecuaria 2001*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. p. 187.

- Luna, A. M. (1993). *Frecuencia serológica de Leptospirosis canina en el Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México*, tesis de Licenciatura. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM, México.
- Luna, A., Moles, C. L., Gavaldón, R., Nava, V. C. y Salazar, G. F. (2008). La leptospirosis canina y su problemática en México. *Revista de Salud Animal*, 30(1), 1–11.
- Luna, A.M.A. (1997). Aspectos clínicos reportados en leptospirosis canina. *1er. Seminario-taller nacional sobre el diagnóstico y control de la leptospirosis*, 23–25 julio. UAM-Xochimilco. CdMx, México.
- Lyons, M. A., Malhotra, R., Thompson, C. W. (2022). Investigating the free-roaming dog population and gastrointestinal parasite diversity in Tulum, México. *PLoS ONE* 17(10), e0276880.
- Marsh, A. E., Lakritz, J. (2023). Reflecting on the past and fast forwarding to present day anthelmintic resistant *Ancylostoma caninum* -A critical issue we neglected to forecast. *Internat J Parasitol: Drugs and Drug Resistance*, 22, 36–43.
- Martin, V. (2023). Variables epidemiológicas que condicionan la presentación de leptospirosis. *Rev Methodo*, 8(5) 02.
- Martínez-Barbabosa, I., Gutiérrez, Q. M., Ruíz, G. L. A., Fernández, P. A. M., Gutiérrez, C. E. M., Aguilar, V. J. M., Shea, M., Gaona, E. (2014). Dipilidiasis: una zoonosis poco estudiada. *Rev Mex Patol Clin Med Lab*, 61(2), 102–7.
- Martínez-Barbabosa, I., Gutiérrez-Cárdenas, E. M., Alpízar-Sosa, E. A., Pimienta-Lastra, R. (2008). Contaminación parasitaria en heces de perros, recolectadas en calles de la ciudad de San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. *Vet Méx*, 39, 173–180.
- Martínez-Barbosa, I., Gutiérrez, M., Ruiz, L., Fernández, A., Gutiérrez, E., Aguilar, J., Shea, M., Gaona, E. (2015). Detección de *Cryptosporidium* spp. y otros parásitos zoonóticos entéricos en perros domiciliados de la Ciudad de México. *Arch Med Vet*, 47, 347–353.
- Matsusaki, G. (1951). Studies on the life history of the hookworm. Part VII: on the development of *Ancylostoma caninum* in the abnormal host. *Yokohama Med Bull*, 2, 154–60.
- Miller, A. D. (2020). Pathology of larvae and adults in dogs and cats. *Adv Parasitol*, 109, 537–544.
- Mills, D. S. (2009). *Dogs in society can prevent society going to the dogs*. *Vet J*, 179(3), 322–333.
- Moles, C. L., Salomón, S., Munguía, A. (1990). Estudio serológico para detectar anticuerpos contra *Leptospira interrogans* en perros de la Ciudad de México. *Memorias del XXI Congreso Nacional de Microbiología*. Villahermosa Tabasco, México; 1990. p. 39.
- Morocoima, A., Herrera, L., Ruíz, E., Córdova, M. y Ferrer, E. (2021). Manifestaciones oculares de la toxocariasis en escolares del Estado Anzoátegui en Venezuela. *Rev Perú Med Exp Salud Pública*, 38(4), 621–626.
- Murcia, C. A., Astudillo, M., Romero, M. H. (2020). Prevalencia de leptospirosis en perros de trabajo vacunados y en población humana con riesgo ocupacional. *Biomédica*, 40(1), 62–75.

- Narayan, K.G., Sinha, D.K., Singh, D.K. (2024). *Dipylidium caninum*. In: *Handbook of Management of Zoonoses*. Springer, Singapore.
- Nezami, R., Blanchard, J. Godoy, P. (2023). The canine hookworm *Ancylostoma caninum*: A novel threat for anthelmintic resistance in Canada. *Can Vet J*, 64(4).
- Ngcamphalala, P. I., Lamb, J., Mukaratirwa, S. (2020). Molecular identification of hookworm isolates from stray dogs, humans and selected wildlife from South Africa. *J Helminthol*, 94, e39.
- Nikitan, A., Melnychuk, V. (2024). Peculiarities of the course of dipylidiosis in dogs depending on the intensity of infestation. *Scientific Progress & Innovations*, 27(2), 143–147.
- Olave-Leyva, J. I., Avila-Castillo, B. R., Martínez-Juárez, V. M., Ocampo-López, J., Salinas-Martínez, J. A., Hernández-González, J. C., Ordóñez-Fernández, M., Figueroa-Castillo, J. A. (2023). Gastrointestinal parasites in feces of stray dogs in Tulancingo Hidalgo, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 10, e1501.
- OMS, Organización Mundial de la Salud. (2022). *Zoonosis*. <https://www.paho.org/es/temas/zoonosis>, consultado el 28/03/2025.
- Orozco, M. J. A., Ruíz, B. J. D., Agudelo, F. P. M., Pérez, G. J. (2021). Factores de riesgo domiciliarios y seroprevalencia de leptospirosis canina en 39 municipios del departamento de Antioquia, Colombia 2018. <http://hdl.handle.net/10946/5216>, consultado el 17/01/2025.
- Ortega, P. A. (2001). *Canine overpopulation: A problem with potential repercussions for human health*. *Rev Biomed*, 12(4), 290–291.
- Ortega, P. A., Jiménez, C. M. (2017). La rabia canina, una zoonosis latente en Yucatán. *Rev Biomed*, 28, 61–63.
- Orúz, A. (2024). Número anual de perros como animal doméstico en Europa entre 2010 y 2023. *Statista*. <https://es.statista.com/estadisticas/592641/numero-de-perros-como-mascota-en-europa/>, consultado el 18/01/25.
- Patz, J. A., Daszak, P., Tabor, G. M., Aguirre, A. A., Pearl, M., Epstein, J., et al. (2004). Unhealthy landscapes: policy recommendations on land, use change and infectious disease emergence. *Env Health Persp*, 112(10), 1092–1098.
- Pérez, G. G. F., Pinta, D., Luna, J., Mizhquero, E. (2023). Frecuencia de leptospirosis en pacientes caninos atendidos en el hospital docente veterinario “César Augusto Guerrero”. *Ciencias Vet Agrop*, 13(1), 31–37.
- Portokalidou, S., Gkentzi, D., Stamouli, V., Varvarigou, A., Marangos, M., Spiliopoulou, I., Dimitriou, G. (2019). *Dipylidium caninum* infection in children: Clinical presentation and therapeutic challenges. *Pediatr Infect Dis J*, 38(7), e157–e159.
- PRONABIVE. (2021). *6 de julio, día mundial de las zoonosis*. <https://www.gob.mx/pronabive/es/articulos/6-de-julio-dia-mundial-de-las-zoonosis?idiom=es>, consultado el 17/01/2025.

- Ramírez, I. H., Calle, E. S., Echevarria, C. L., Morales, C. S. (2006). Prevalencia de brucelosis canina en dos distritos de la Provincia Constitucional del Callao. *Revista de investigaciones Veterinarias del Perú*, 2006, 17(1), 39–43.
- Raux, H., Flamand, A., Blondel, D. (2000). Interaction of the rabies virus P protein with the LC8 dynein light chain. *J Virol*, 74(21), 10212–6.
- Ricardo, T., Bazán, D. L., Beltramini, L., Prieto, Y., Montiel, A., Margenet, M. L., Schmeling, F., Chiani, Y. T., Signorini, M. L., Previtali, A. (2024). Seroprevalence of *Leptospira* antibodies in dogs and cats from Santa Fe, a city in East-Central Argentina endemic for leptospirosis. *Preventive Veterinary Medicine*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2024.106239>, consultado el 16/12/2024.
- Ricardo, T., Previtali, A., Signorini, M. (2020). Meta-analysis of risk factors for canine leptospirosis. *Preventive Veterinary Medicine*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.prevetmed.2020.105037>, consultado el 17/12/2024.
- Ridzuan, J. M., Aziah, D., Zahiruddin, W. M. (2016). Factores de riesgo relacionados en el ambiente para la leptospirosis entre trabajadores de plantación en países tropicales: Evidencia de Malasia. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 77, 156–163.
- Rojas-Salamanca, A. C., León-Bustamante, M. C., Bustamante-Saavedra, O. R. (2016). *Toxocara canis*: una zoonosis frecuente a nivel mundial. *Ciencia y Agricultura*, 13(1), 19–27.
- Romero, N. C. García, C. A., Mendoza, M. G., Torres, C. N., Ramírez, D. N., 2009, “Contaminación por *Toxocara* spp en parques de Tulyehualco, México”, *Revista Científica*, XIX(3), 253–258.
- Rousseau, J., Castro, A., Novo, T., Maia, C. (2022). *Dipylidium caninum* in the twenty-first century: epidemiological studies and reported cases in companion animals and humans”. *Parasites & Vectors*, 15(1), 1–13.
- Sánchez. P. M., Díaz, S. O., Sanmiguel, R. A., Ramírez, A. A. Escobar, L. (2019). Rabia en las Américas, varios desafíos y Una sola Salud: artículo de revisión. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 30(4), 1361–1381.
- Sánchez-Montes, S. D. (2020). Una historia manchada: El caso de las fiebres maculosas en México. *Zoonosis, perspectivas y actualidades*. Edit. Prometeo, Guadalajara, Jalisco, México.
- Schiavo, L., Ribeiro, M. L., de Almeida, M. B., Da Cunha, G. R., Espírito Santo, G. A. N., Morikawa, V. M. & et al. (2024). One Health approach for *Brucella canis*: Serological and molecular detection in animal-hoarding individual sand their dogs. *PLOS Negl Trop Dis*, 18(3), e0011974. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0011974>
- Scialfa, E. A. (2021). Epidemiología de la leptospirosis canina. *Congreso de la Microbiología Veterinaria*. Libro 1 de resúmenes. La Plata, Facultad de Ciencias Veterinarias. 4-6 de agosto.
- Sebzda, M. K., Kauffman, L. K. (2023). Update on *Brucella canis*: Understanding the past and preparing for the future. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*, 53(5), 1047–1062.

- Secretaría de Salud, Dirección General de Epidemiología. (2024). *Manual de procedimientos estandarizados para la vigilancia epidemiológica de rabia humana*. https://epidemiologia.salud.gob.mx/gobmx/salud/documentos/manuales/27_Manual_VE_RabiaenHumano_2023.pdf, consultado 9/12/2024.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2023). *Van 137 mil 440 animales de compañía, registros en el RUAC de Sedema*. <https://sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/van-137-mil-440-animales-de-compania-registros-en-el-ruac-de-la-sedema>, consultado el 18/01/2025.
- Serrano-Martínez, E., Burga, C. C., Hinostroza, M. E. y Zúñiga, F. R. (2020). Influencia de las estaciones climáticas en la presencia de leptospirosis canina en el norte y centro de Lima, Perú. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 31(4), e19018.
- Shengli, M., Qian, L., Yan, S., Wenjuan, W., Jie, W., Jinrong, S., Zejun, W., Xingguo, L. (2021). A case of human rabies with a long incubation period in Wuhan. *IDCases*, 23, 2021, e00998
- Siuce, J., Calle, S., Pinto, C., Pacheco, G., Salvatierra, G. (2015). Identificación de serogrupos patógenos de *Leptospira* en canes domésticos. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 26: 664–675.
- Statista (2024). *Número de perros en EE.UU. en 2024, estadísticas, datos demográficos y tendencias*. Disponible en https://financesonline-com.translate.google/number-of-dogs-in-the-us/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc, consultado el 18/01/2025.
- Stone, W. M., Girardeau, M. (1968). Transmammary passage of *Ancylostoma caninum* larvae in dogs. *J Parasitol*, 54: 426–9.
- Sykes, J. E., Francey, T., Schuller, S., Stoddard, R. A., Cowgill, L. D., Moore, G. E. (2023). Updated ACVIM consensus statement on leptospirosis in dogs. *J Vet Intern Med*, 1-17.
- Sykes, J., Haake, D., Gamage, C., Mills, W. y Nally, J. (2022). A global one health perspective on leptospirosis in humans and animals. *J. A. V. M. A.*, 260(13): 1589–1596.
- The Center for Food Security and Public Health. (2005). *Leptospirosis*. *Iowa State University College of Veterinary Medicine*. <https://www.cfsph.iastate.edu/Factsheets/es/leptospirosis-es.pdf>, consultado 30/03/2025.
- Thiravat, H., Ugolini, G., Wacharapluesadee, S., Sungkarat, W., Shuangshoti, S., Laothamatas, J. (2013). Human rabies: neuropathogenesis, diagnosis, and management. *The Lancet Neurology*, 12(5): 498–513.
- Torres, C. M., Cruz, R. A., Ochoa, V. J., Torres, L. M., Lugo, C. C. (2023). La rabia: enfermedad zoonótica reemergente en México. *Bioagrobiencias*, 16(1): 15–26.
- Torres-Chablé, O. M., García-Herrera, R. A., Hernández-Hernández, M., Peralta-Torres, J. A., Ojeda-Robertos, N. F., Blitvich, B. J., Baak-Baak, C. M., García-Rejón, J. E., Machain-Wiliams, C. I. (2015). Prevalence of gastrointestinal parasites in domestic dogs in Tabasco, southeastern Mexico. *Braz J Vet Parasitol, Jaboticabal*, 24(4): 432–437.

- Tuermers, C., Lüders, C., Rojas, C., Serri, M., Castillo, C., Espinoza, R. (2011). Detección de *Brucella canis* por método de inmunocromatografía en perros vagos capturados en la ciudad de Temuco, Chile. *Rev Chil Infectol*, 30(4): 395–401.
- Ugbomoiko, U. S., Ariza, L., Heukelbach, J. (2008). Parasites of importance for human health in Nigerian dogs: high prevalence and limited knowledge of pet owners. *BMC Vet Res*, 4(1): 49.
- US Centers for Disease Control and Prevention. *Dipylidium caninum*. DPDx - Laboratory identification of parasites of public health concern. <https://www.cdc.gov/dpdx/dipylidium/index.html>, consultado el 28/03/2025.
- Vega-Aragón, R. L. (2009). Zoonosis emergentes y reemergentes y principios básicos de control de zoonosis. *Revista Medica Veterinaria*, 1(17): 85–97.
- Wahab, Z. A. (2018). *Epidemiología y situación actual de Leptospirosis en Malasia; Procedimientos de la Conferencia de Salud Ambiental de las Autoridades Locales*. Labuan, Malasia. 8o 9 de septiembre de 2015. <http://jkt.kpkkkkt.gov.my/jkt/resources/PDF/Persidangan.2015/persidangan%20kesihatan/Leptospirosis.in.Malaysia.pdf>, consultado el 18/12/2024.
- WHO, World Health Organization, UNEP United Nations Environment Programme, & World Organisation for Animal Health. (2022). *One health joint plan of action (2022–2026): working together for the health of humans, animals, plants and the environment*. World Health Organization.
- WHO, World Health Organization. (2021). *Rabies*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/rabies>, consultado el 04/04/2025.
- WHO, World Health Organization. (2023). One health. https://www.onehealthcommission.org/en/why_one_health/what_is_one_health/, consultado el 19/1/2025.
- Yaguana, J., López, M R. (2017). La rabia canina: su historia, epidemiología y sus medidas de control. *REDVET*, 18(9),1–13.
- Yantorno, M. L. (2018). *Estudio de seroprevalencia de infección por Brucella canis en veterinarios del Partido de la Plata*. Disponible en URI: <https://repositorio.unnoba.edu.ar/xmlui/handle/23601/163>, consultado el 2/12/2024.

Ecodiseño como estrategia de sustentabilidad en el sistema de producción de barbacoa en el municipio de Capulhuac, Estado de México

Ignacio López Moreno¹, Omar Miranda Gómez²,
Félix Aguirre Garrido³

Resumen. Entre los diferentes elementos que caracterizan a la economía circular se encuentra el ecodiseño, entendido como la aplicación de medidas preventivas que ayudan a disminuir el impacto ambiental. El uso de estas innovaciones permite mejorar las cadenas de suministro alimentarias y hacer un uso más eficiente de los recursos. Como caso de estudio, se ha analizado el municipio de Capulhuac, en el Estado de México, que se caracteriza por la producción y venta de barbacoa en el altiplano central. Como parte de este sistema productivo, se han identificado una serie de impactos ambientales derivados de la mala gestión de algunos de sus residuos. En este sentido, el objetivo es proponer una serie de estrategias vinculadas al ecodiseño que permitan reducir los impactos ambientales de este sistema productivo. Mediante revisión documental y trabajo de campo (2023-2025), se propusieron soluciones circulares como el caso de biofiltros para el tratamiento de aguas residuales, y el vermicompostaje para el aprovechamiento de residuos orgánicos. Se concluye mencionando que el éxito de estas estrategias requiere políticas públicas integradas, financiamiento y capacitación continua que permitan su viabilidad.

Palabras clave: Ecodiseño, Capulhuac, Economía circular, Sistema alimentario, Residuos.

¹ Doctor en Ciencias Sociales por la Universidad de Wageningen. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma.

² Doctor en Ciencias Sociales por el Colegio de Jalisco. Correo electrónico: o_miranda@correo.ler.uam.mx. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma.

³ Doctor en Ciencias Biológicas y de la Salud por la Universidad Autónoma Metropolitana. Correo electrónico: j.aguirre@correo.ler.uam.mx, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Lerma.

Abstract. *Among the different elements that characterize the circular economy is eco-design, understood as the application of preventive measures that help to reduce environmental impact. The use of these innovations makes it possible to improve food supply chains and make more efficient use of resources. As a case study, the municipality of Capulhuac, in the State of Mexico, which is characterized by the production and sale of barbecue in the central highlands, has been analysed. As part of this production system, a series of environmental impacts have been identified because of the poor management of some of its wastes. In this sense, the objective is to propose a series of strategies linked to eco-design to reduce the environmental impacts of this production system. Through documentary review and field work (2023-2025), circular solutions were proposed, such as the case of biofilters for wastewater treatment and vermicomposting for the use of organic waste. We conclude by mentioning that the success of these strategies requires integrated public policies, financing and continuous training to ensure their viability.*

Keywords: *Eco-design, Capulhuac, Circular economy, Food system, Waste.*

INTRODUCCIÓN

La economía circular y el ecodiseño son conceptos estrechamente relacionados y cada vez más demandados en diversos campos. En general, la economía circular y el ecodiseño son enfoques complementarios que tienen el propósito de mejorar la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente de los recursos. La economía circular tiene el propósito de transformar los sistemas de producción lineales en sistemas circulares, teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de un producto. El término ecodiseño o también nombrado diseño ecológico, refiere a cualquier forma de diseño que permite reducir el impacto ambiental al estar integrado con el entorno natural (Khan, *et al.*, 2021a). A su vez, implica reinsertar los residuos en el proceso de producción, utilizarlos como materia prima para nuevos productos y minimizar el impacto ambiental (Rodríguez, *et al.*, 2022). Del mismo modo, supone no solo el consumo de energía, sino también otros aspectos ambientales (Barkhausen, *et al.*, 2022).

Para 2021, el 13% de los alimentos producidos a nivel mundial, se perdieron a lo largo de la fase de suministros (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2024, p. XII). A nivel nacional se consumen 1,000 gr. de carne ovina per cápita y se estima que el 90% se destina a la elaboración de barbacoa (Santoyo-Cortés y Martínez-González, 2021). Durante la producción de barbacoa se generan una serie de subproductos que no se aprovechan de forma eficiente, por lo que es necesario idear estrategias para disminuir su desperdicio como la aplicación del ecodiseño tanto de productos como en el desarrollo territorial.

Capulhuac se ha caracterizado por contar con población que se dedica a la elaboración de barbacoa desde finales de los 1950. Este sistema productivo ha dinamizado una cadena de producción y

consumo, además de otras actividades económicas que se desprenden de cada fase de producción y que buscan utilizar los residuos bajo otros fines. En este sentido, se ha planteado el objetivo de proponer una serie de estrategias vinculadas a la noción de ecodiseño que permitan reducir los impactos ambientales de este sistema productivo.

Este documento se integra de la siguiente manera. En primer lugar, se realiza una aclaración metodológica. En segundo término, se expone la relación entre el ecodiseño, la economía circular y el desarrollo sustentable. Después, se hace referencia a la importancia del ecodiseño en la propuesta de políticas públicas. Posteriormente, se expone el contexto ambiental de la producción de barbacoa en Capulhuac. Seguido de ello, se proponen una serie de estrategias de gestión de residuos fundamentadas en la noción de ecodiseño. Finalmente, se generan una serie de conclusiones derivadas del proceso de análisis.

Nota metodológica

El estudio adoptó un enfoque metodológico mixto que combinó la revisión sistemática de literatura especializada con trabajo de campo etnográfico. En la fase documental, se analizaron fuentes académicas con especial énfasis en estudios recientes sobre ecodiseño aplicado a sistemas agroalimentarios, así como documentos normativos como la Estrategia Nacional de Economía Circular (SEMARNAT, 2024). Este análisis permitió identificar mejores prácticas internacionales adaptables al contexto local.

La investigación de campo se desarrolló entre 2023 y 2025 mediante técnicas complementarias: observación participante en el municipio de Capulhuac, donde se documentaron los flujos de residuos mediante diarios de campo; entrevistas semiestructuradas a actores clave (productores, introductores de ganado y funcionarios municipales). El diseño de las propuestas incorporó criterios de viabilidad técnica, económica y social. Esta triangulación metodológica, permitió desarrollar soluciones contextualizadas.

Desarrollo sostenible, economía circular y ecodiseño

En 2015 con la creación de la Agenda 2030 del desarrollo sostenible se presentó una ruta de acción para cumplir los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), este instrumento es una herramienta de planificación y seguimiento con la intención de promover el equilibrio del desarrollo en las diversas regiones del mundo (Cepal, 2019). En este sentido, la economía circular se posiciona como una alternativa para atender algunas metas propuestas por los ODS. Este modelo puede contribuir al cumplimiento de algunos objetivos, como lo son el caso del hambre cero (ODS 2) y de la producción y el consumo responsa-

bles (ODS 12); entre las metas planteadas está la reducción a la mitad de las pérdidas de alimentos en las cadenas de producción y suministro (ONU, 2024).

Aunque la economía circular tiene la potencialidad de incentivar el desarrollo sostenible, esta podría ser contraproducente porque podría contribuir a la degradación sustentable al enfocarse solamente en la eficiencia de los recursos sin considerar el tema de la degradación (Oliveira *et al.*, 2021 citado en Timm, *et al.*, 2023).

En contraste, los principios del ecodiseño se pueden aplicar a la producción de alimentos en toda la cadena de valor para aumentar la sostenibilidad y abordar los desafíos que plantean los sistemas agroalimentarios actuales (Silva, *et al.*, 2023). La implementación de estrategias de diseño ecológico, como el abastecimiento sostenible, el uso optimizado de los recursos y la optimización al final de la vida útil, puede reducir significativamente el impacto ambiental de la producción de alimentos y contribuir al cambio dietético (Saiga, 2023).

La relación de la economía circular con el ecodiseño ha sido abordada para atender problemáticas como el uso de envases y embalajes que permitan el traslado de productos (Huerta, 2020). En el contexto internacional, algunos países han adoptado medidas de ecodiseño para la industria cárnica; principalmente en el uso de empaques (aligerar los envases, mejoras en los materiales o eliminación de algunos elementos nocivos) (MEAT 2030, 2022). En México, se han realizado estudios donde analizan los avances de la aplicación de la economía circular en el sector ganadero en el sureste de México; donde algunas estrategias asociadas con el ecodiseño son la integración de sistemas silvopastoriles intensivos, la valoración de los subproductos y el diseño de cadenas de valor circulares (Villavicencio, *et al.*, 2023).

El ecodiseño como una estrategia de política pública

El ecodiseño puede ser aplicado bajo diversas perspectivas, desde el ámbito de la planeación urbana hasta el desarrollo de productos. Para nuestro objetivo, se harán uso de ambas perspectivas para proponer estrategias de mejora del territorio bajo una perspectiva de economía circular.

El ecodiseño dentro del urbanismo ha sido aplicado bajo diferentes propósitos, como la construcción de corredores viales (Amir, *et al.*, 2022), para la planeación de barrios sostenibles (Farreny, *et al.*, 2011), construcción de vertederos de residuos sólidos (Díez, 2019), fomentar la climatización mediante la captación de lluvias (Guerra-Ayala, *et al.*, 2022).

La aplicación del ecodiseño para el desarrollo territorial (tanto en el entorno urbano como en el rural) debe considerar los siguientes elementos clave: 1) manejar la complejidad de los territorios; 2) hacer que la población y el crecimiento económico sean sostenibles; 3) considerar un proceso de diseño interdisciplinario; 4) contemplar la participación ciudadana; 5) respetar tanto el contexto natural como el construido; 6) emplear diversos métodos de diseño (Barnett y Beasley, 2015). Para el caso de estudio,

al ser un municipio que transita entre modos y formas de vida urbanas y rurales, es necesario considerar el conjunto de elementos para la promoción de estrategias que incentiven la economía circular.

A su vez, el desarrollo de productos con base en la noción de ecodiseño, deben considerar los siguientes aspectos. 1) diseño fácil de ensamblar y desensamblar; 2) de fácil mantenimiento; 3) creado para que se pueda reparar; 4) que se pueda re-manufacturar para mejorar; 5) que se pueda reciclar o compostar; 6) que su diseño sea sustentable en el tiempo y 7) que considere principios de economía compartida (Van Doorsselaer, 2022).

En este sentido, las políticas públicas desempeñan un papel crucial en la promoción del ecodiseño como estrategia para la sostenibilidad de los sistemas alimentarios. Además, la integración de la economía a través de regulaciones, mecanismos de precios, impuestos y sistemas comerciales sólidos puede establecer un marco de producción y consumo sostenible (Khan, *et al.*, 2021b).

En el contexto nacional y del Estado de México, se han comenzado a debatir sobre algunos mecanismos de economía circular que comiencen a integrar elementos asociados con el ecodiseño (SEMARNAT, 2024). De manera concreta, existe una propuesta de ley de economía circular en el Estado de México que al momento de la escritura de este documento estaba siendo debatida. Esta iniciativa está tomando como referencia la Ley General de Economía Circular aprobada el 28 de febrero de 2023 por el Gobierno de la Ciudad de México, cuyos tres principales instrumentos de política pública son: (1) Evaluación de Circularidad, (2) Distintivo de Circularidad y (3) Programa de Economía Circular de la Ciudad de México.

En este sentido, entendemos que las políticas públicas y gubernamentales pueden fortalecer la salud de los ecosistemas mediante la adopción de modelos ecológicos sostenibles basados en el suelo, que garantizan una mayor productividad y rentabilidad al tiempo que garanticen un desarrollo sostenible global (Raj, *et al.*, 2021). Al integrar los principios del ecodiseño en las cadenas alimentarias, se pueden optimizar el uso de recursos, minimizar el desperdicio y mejorar los ciclos de vida de los productos.

El contexto ambiental en la producción de barbacoa en Capulhuac

Capulhuac es un municipio ubicado en el Estado de México, que albergaba en 2020 a 36,921 habitantes; siendo 48.15% del sexo masculino y 51.85% del sexo femenino (INEGI 2020). Este municipio, a su vez, forma parte de la Zona Metropolitana de Tianguistenco, una de las tres del Estado de México. La población de este municipio se dedica principalmente a la elaboración y venta de barbacoa.

Se ha observado que esta actividad económica afecta el entorno natural que rodea al municipio. Aunque existen diversos residuos que se generan a lo largo de esta cadena alimentaria afectando el entorno, se reconocen dos principales: la sangre y el contenido ruminal. Respecto a la sangre, en promedio cada borrego produce entre 0.75 y 1 litro (Veall, 1993) y semanalmente se estima que sacrifican entre 10

y 15 mil borregos (López, 2022), lo que se traduce entre 10 y 15 mil litros de sangre aproximadamente que son derramados al drenaje. Las descargas de aguas residuales son vertidas primordialmente en el Río Xalatlaco (Ayuntamiento de Capulhuac, 2022), siendo los jueves y viernes los días donde mayor cantidad de desechos de este tipo son generados debido a que son los días destinados para el sacrificio de ovinos.

Entre los usos que se les puede dar a este subproducto está la elaboración de platillos y la elaboración de suplementos alimenticios a partir de la elaboración de harina de sangre (Pelcastre *et al.*, 2018). Existen diversas formas de elaborar este producto; mediante procesos más tecnificados hasta procedimientos más artesanales (Cienfuentes, 2007).

Por otro lado, el contenido ruminal es otro subproducto del ovino que no es aprovechado de manera eficiente. Este residuo puede ser empleado de diferentes maneras, 1) como composta para la producción agrícola (Bohórquez-Sandoval, *et al.*, 2020), 2); como biomasa para la generación de combustible (Weimer, 2015) y como fuente de alimentación complementaria para el ganado (Elfaki y Abdelatti, 2016). En promedio el contenido ruminal es de 4 kilogramos por ovino, lo que representa una gran generación de residuos considerando la cantidad de borregos que se sacrifican a la semana. Por tal razón, la cantidad de desechos generada a nivel municipal es un problema público debido al inadecuado manejo de estos residuos. Para ambos casos de aprovechamiento de los residuos, se requiere de fomentar estrategias acordes al contexto territorial y social.

Propuestas de ecodiseño para mejorar las condiciones ambientales en el sistema producto barbacoa de Capulhuac

A continuación, se proponen dos estrategias que ayudarían a mejorar las condiciones ambientales del municipio de Capulhuac como resultado del sistema producto barbacoa. En primer lugar, se propone la implementación de biofiltros como una alternativa que permite el tratamiento de las aguas residuales (Garzón-Zúñiga, *et al.*, 2012 y WSP, 2006), en algunos casos estas tecnologías es una alternativa viable porque genera bajos costos de inversión (Hernández, *et al.*, 2014).

La filtración es un proceso usado para el tratamiento de agua y aguas residuales. En este segundo tratamiento, el proceso de filtración busca producir efluentes de alta calidad para que pueda reutilizarse para varios fines (Chaudhary, *et al.*, 2003). Se ha planteado esta estrategia como una alternativa viable debido a los costos de implementación, los cuales rondan los 4,000 pesos y permiten filtrar en promedio 100 litros por día.

La segunda propuesta consiste en la aplicación de vermicomposteros que coadyuven a la degradación de materia orgánica, como es el caso del contenido ruminal y de los residuos vegetales. El proceso

de compostaje acompañado con el uso de lombriz roja californiana permite degradar la materia orgánica en un promedio de tres meses.

La tabla 1 sintetiza tres estrategias de ecodiseño para gestionar los residuos de la barbacoa en Capulhuac, integrando soluciones técnicas, actores responsables y mecanismos de financiamiento. Cada propuesta parte de diagnósticos locales y experiencias latinoamericanas exitosas, articulando economía circular con políticas públicas y participación comunitaria para garantizar su sostenibilidad.

Tabla 1. Propuesta de Ecodiseño para el sistema productivo de barbacoa en Capulhuac

Estrategia	Descripción	Responsables	Fuente de Financiamiento	Impacto Esperado
Biofiltros para tratamiento de aguas residuales	Sistemas de filtrado con materiales locales (tezontle, carbón activado) para tratar aguas contaminadas con sangre	Ayuntamiento de Capulhuac Cooperativas de productores	Fondos municipales	Reducción de la contaminación de agua
Vermicompostaje de contenido ruminal	Uso de lombriz roja californiana para transformar residuos orgánicos en compost agrícola	Ayuntamiento de Capulhuac Productores locales	Ayuntamiento de Capulhuac SECAMPO	Aprovechamiento de residuos ruminales
Harina de sangre para alimentación animal o fertilizante	Secado artesanal de sangre para producir suplemento proteico o biofertilizante	Sector pecuario Matanceros	SECAMPO	Valorización de la sangre generada

Fuente: Elaboración propia con base en trabajo de campo.

En resumen, el ecodiseño se integra como eje transversal en esta propuesta, aplicando principios de economía circular para transformar los residuos de la producción de barbacoa en recursos valiosos. Desde el diseño de los biofiltros hasta los procesos de vermicompostaje, cada solución incorpora criterios de eficiencia ambiental, viabilidad económica y adaptación al contexto local, minimizando el impacto desde la fase conceptual.

La implementación de biofiltros ejemplifica el ecodiseño al utilizar materiales locales (tezontle y carbón activado) que reducen costos y facilitan el mantenimiento. Esta solución, junto con el vermicompostaje de contenido ruminal, demuestra cómo el diseño ecológico puede cerrar ciclos de materiales, transformando problemas ambientales en oportunidades productivas con beneficios económicos para los campesinos.

En cuanto al componente social del ecodiseño, se asociaría con la capacitación a personas para operar estas tecnologías, asegurando su apropiación y sostenibilidad a largo plazo. Financieramente, la propuesta integra mecanismos circulares: los subproductos (compost, harina de sangre) generarán ingresos que retroalimentarán el sistema. Como política pública, esta propuesta deberá alinearse con la Estrategia Nacional de Economía Circular, demostrando cómo el ecodiseño puede traducirse en acciones concretas para los municipios.

CONCLUSIONES

El ecodiseño es un concepto respetuoso con el medio ambiente que contribuye a la urgente necesidad de un progreso tangible hacia una economía humana sostenible. Los principios del ecodiseño se pueden aplicar a las cadenas alimentarias para reducir el impacto ambiental de la producción de alimentos y promover la sostenibilidad ambiental.

El ecodiseño puede ayudar a abordar los principales puntos críticos ambientales de las cadenas agroalimentarias de manera eficiente y a reducir la generación de residuos, teniendo en cuenta al mismo tiempo los aspectos sociales y económicos de la sostenibilidad. Las prácticas de ecodiseño pueden contribuir a la preservación de la vida silvestre, a la conservación de los recursos naturales y a la sostenibilidad ecológica en general.

La adopción de modelos de diseño ecológico en los suelos puede garantizar una mayor productividad, rentabilidad y un desarrollo sostenible en general del mundo. El diseño ecológico de diferentes sistemas de uso de la tierra, como la agricultura, la silvicultura, la agrosilvicultura y otras prácticas agrícolas, puede ayudar a minimizar la degradación del suelo y garantizar un suelo sano y de calidad, lo que conduce a la sostenibilidad ambiental.

La adopción del diseño ecológico como estrategia de política pública puede fortalecer la salud de los ecosistemas, promover políticas de gestión sostenible, combatir el cambio climático y garantizar la sostenibilidad ambiental general de las cadenas alimentarias.

Las estrategias de ecodiseño, como la implementación de biofiltros, pueden ayudar a reducir el impacto ambiental del sistema de producción de barbacoas en Capulhuac.

El uso de los principios del ecodiseño en las cadenas alimentarias puede mejorar la sostenibilidad y la eficiencia ambiental. Las prácticas de ecodiseño pueden abordar los puntos ambientales críticos de las cadenas agroalimentarias de manera eficiente, reduciendo la generación de residuos y teniendo en cuenta los aspectos sociales y económicos de la sostenibilidad. El ecodiseño puede contribuir a la preservación de la vida silvestre, a la conservación de los recursos naturales y a la sostenibilidad ecológica en general.

AGRADECIMIENTOS Y RECONOCIMIENTOS

A la S a de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo para la realización del proyecto “Desperdicio en la cadena de suministro de elaboración de barbacoa. Un análisis de economía circular” como parte de la estancia posdoctoral en modalidad académica de la convocatoria 2022(1).

A la Universidad Autónoma Metropolitana, por el apoyo en la realización del proyecto de incidencia social, “Fomento de la economía circular en la producción y consumo de barbacoa en el municipio de Capulhuac, Estado de México. Estrategias hacia la sustentabilidad socioterritorial”.

BIBLIOGRAFÍA

- Amir, S., Bonifacius, N., y Poerwoningsih, D. (2022). *Eco-design concept of street corridors as a city image forming*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 999(1): <https://doi.org/012018.10.1088/1755-1315/999/1/012018>
- Ayuntamiento de Capulhuac. (2022). *Plan municipal de desarrollo 2022-2024*. Disponible en <https://capulhuac.edomex.gob.mx/sites/capulhuac.edomex.gob.mx/files/files/PDM%202022-2024/PDM.Capulhuac.2022-2024%2011.08.2022%20ok.pdf>, consultado el 23/06/2025.
- Barkhausen, R., Durand, A., y Fick, K. (2022). Review and Analysis of Ecodesign Directive Implementing Measures: Product Regulations Shifting from Energy Efficiency towards a Circular Economy, *Sustainability*, 14(16): 10318. <https://doi.org/10.3390/su141610318>
- Barnett, J., y Beasley, L. (2015). Ecodesign for cities and suburbs, *Island Press*, Washington, DC: https://link.springer.com/chapter/10.5822/978-1-61091-406-2_1
- Bohórquez-Sandoval, L., García-Molano, F., Murillo-Arango, W., Cuervo-Bejarano, J., y Pulido-Soler, N. (2020). Vermicomposting: a transformation alternative for rumen content generated in slaughterhouses, *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(2): 9201-9212. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v73n2.80104>
- Cepal, N. U. (2019). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe, *CEPAL*, Santiago de Chile. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c41bc64e-b240-4f80-802d-4a60484a02e4/content>
- Chaudhary, D. S., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Shim, W. G., y Moon, H. (2003). *Biofilter in water and wastewater treatment*. Korean Journal of Chemical Engineering, 20: 1054-1065. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02706936>
- Cienfuentes, O., 2007. *Proceso artesanal de producción de harina de sangre de bovino*. Disponible en https://www.engormix.com/balanceados/miscellaneous/proceso-artesanal-produccion-harina_a27375/, consultado el 22/06/2025.
- Díez, J. M. B. (2019). Consideración del ecodiseño en la redacción de proyectos y obras de construcción de vertederos. *Ejemplo de aplicación en el vertedero de Artigas*. DYNA, 94(6): 599-599. <http://dx.doi.org/10.6036/9361>
- Elfaki, M. O., y Abdelatti, K. A. (2016). Rumen content as animal feed: a review, *Journal of Veterinary Medicine and Animal Production*, 7(2): 80-88
- Farreny Gaya, R., Rieradevall, J., Oliver i Solà, J., Montlleó, M., Escriba, E., y Gabarrell Durany, X. (2011). The ecodesign and planning of sustainable neighbourhoods: the Vallbona case study (Barcelona), *Informes de la Construcción*, 63:115-124. <https://doi.org/10.3989/ic.11.069>
- Garzón-Zúñiga, M. A., Buelna, G., y Moeller-Chávez, G. E. (2012). La biofiltración sobre materiales orgánicos, nueva tecnología sustentable para tratar agua residual en pequeñas comunidades e

- industrias, *Tecnología y ciencias del agua*, 3(3): 153-161. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v3n3/v3n3a11.pdf>
- Guerra-Ayala, M. A., Gutiérrez-Paredes, G. J., y Sandoval-Pineda, J. M. (2022). Ecodiseño de suelo radiante utilizando sistemas de captación de aguas lluvias. *IEEE Central America and Panama Student Conference (CONESCAPAN)*: 1-5. <https://doi.org/10.1109/CONESCAPAN56456.2022.9959277>
- Hernández, D. S., Cortés, J. V., y Calderón, E. J. H. (2014). La biofiltración: Una alternativa sustentable para el tratamiento de aguas residuales. *Vidsupra*, 6 (2): 56-60. <https://www.ciirdurango.ipn.mx/assets/files/ciirdurango/docs/VIDSUPRA/REVISTAS/VSV6N2.pdf#page=12>
- Huerta, O. (2020). Ecodiseño de envases para una economía circular, *RChD: Creación y Pensamiento*, 5(9): 1-12. <https://doi.org/10.5354/0719-837X.2020.58303>
- INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#tabulados>, consultado el 23/06/2025
- Khan, N., Jhariya, M.K., Raj, A., Banerjee, A., Meena, R.S. (2021). Eco-Designing for Sustainability. Jhariya, M.K., Meena, R.S., Banerjee, A. (eds.) *Ecological Intensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3_16
- Khan, N. H., Nafees, M., ur Rahman, A., y Saeed, T. (2021). Ecodesigning for ecological sustainability. En Tariq Aftab y Khalid Rehman Hakeem (eds.) *Frontiers in plant-soil interaction*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90943-3.00019-5>
- López, I. (2022). Capulhuac, la meca de la barbacoa, *Universo agroalimentario*, (8): 47-52. <https://tinyurl.com/56znd5zp>
- MEAT2030, (2022). *La industria cárnica se suma al ecodiseño para mejorar la sostenibilidad de sus envases*. Disponible en <https://meat2030.com/la-industria-carnica-se-suma-al-ecodiseno-para-mejorar-la-sostenibilidad-de-sus-envases/>, consultado el 25/06/2025.
- ONU, (2024). *Objetivos del desarrollo sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>, consultado el 23/06/2024
- Pelcastre, V., Ramírez, S., Cruz, E. A., Hernández, M., Ruíz, A. K., y Vázquez, G. A. (2018). Aprovechamiento de Sangre Ovina para la Elaboración de un Sustituto de Empanizador, *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 5(10): 1-3 <https://doi.org/10.29057/icbi.v5i10.2875>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2024. Informe sobre el índice de desperdicio de alimentos 2024, *PNUMA, Nairobi*. Disponible en <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/45230;jsessionid=FF67DD5B793BC5B8421E9EF136301845>, consultado el 23/06/2025.
- Raj, A., Jhariya, M. K., Khan, N., Banerjee, A., Poonam, Meena, R. S., y Jakhar, S. R. (2021). Eco-Designing for Soil Health and Services. Jhariya, M.K., Banerjee, A., Meena, R.S., Kumar, S.,

- Raj, A. (eds). *Sustainable Intensification for Agroecosystem Services and Management*, Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3207-5_4
- Rodríguez Martín, J., López-Errasti, O., y Ruiz de Arbulo López, P. (2022). Analysis of the impact of eco-design on the circular economy: a bibliometric analysis of publications in Spain, *Dyna*, 89(224): 140-147. <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n224.102669>
- Saiga, D. (2023). Strategy for sustainable food systems-innovation will enhance potential and ensure sustainability in a compatible manner in the agriculture, forestry, fisheries and food sectors, *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaishi*, 70 (6): 255–270. <https://doi.org/10.3136/nskkk.NS-KKK-D-23-00006>
- Santoyo-Cortés, V. H., y Martínez-González, E. G. (2021). Tendencias y Modelos de Negocio en la Ovinocultura Mexicana. *XXI Congreso Internacional de Ovinocultura*. https://www.researchgate.net/publication/351075692_Tendencias_y_modelos_de_negocio_en_la_ovinocultura_mexicana, consultado el 25/06/2025
- Semarnat. (2024). *Bases para la Elaboración de un Diagnóstico de la Estrategia Nacional de Economía Circular en México*. https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2024/BASES_ELABORACION_DIAGNOSTICO_PARA_ENEC.pdf, consultado el 24/06/2025
- Silva, B. Q., Vasconcelos, M. W., y Smetana, S. (2023). Conceptualisation of an Ecodesign Framework for Sustainable Food Product Development across the Supply Chain, *Environments*, 10(4): 59. <https://doi.org/10.3390/environments10040059>
- Timm, J. F. G., Maciel, V. G., y Passuello, A. (2023). Towards Sustainable Construction: A Systematic Review of Circular Economy Strategies and Ecodesign in the Built Environment, *Buildings*, 13(8): 2059. <https://doi.org/10.3390/buildings13082059>
- Van Doorselaer, K. (2022). The role of ecodesign in the circular economy. En Alexandros stefanakis y Ioannis Nikolaou (eds.), *Circular Economy and Sustainability*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819817-9.00018-1>
- Veall, F. (1993). *Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países en desarrollo Food & Agriculture Organization*. <https://www.fao.org/3/t0566s/T0566S05.htm#:~:text=Para%20las%20ovejas%2C%20de%200,los%20cerdos%2C%20de%203%20litros>, consultado el 23/06/2025
- Villavicencio, M., Salazar, M., y Meléndez, J. (2023). Adaptación al cambio climático con enfoque de economía circular para reducir la vulnerabilidad del sector ganadero extensivo en México: estado del arte. *Regiones y Desarrollo Sustentable*, 23(44): 1-26. <http://www.elcoltlax.edu.mx/openj/index.php/ReyDS/article/view/252>
- Weimer, P.J. (2015). Ruminant Fermentations to Produce Liquid and Gaseous Fuels. En Puniya, A., Singh, R., Kamra, D. (eds.), *Rumen Microbiology: From Evolution to Revolution*, Springer, New Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2401-3_18

WSP. (2006). *Biofiltro: Una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades*. WPS. Disponible en <https://ecotec.unam.mx/wp-content/uploads/Proyecto-de-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-con-Biofiltros.pdf>, consultado el 24/06/2025

Más allá del colonialismo verde: justicia global y geopolítica de las transiciones ecosociales¹

Héctor López Terán²

En un suelo en llamas, abrasado por la presión global que despierta la preocupación ecológica y la devastación que consume al planeta, la destrucción de ecosistemas y el imparable ascenso de la temperatura, el capitalismo se quema los pies por ofrecer soluciones sutilmente disfrazadas de esperanza, que no son más que una respuesta capitalista ante la crisis ecológica. La solución, empero, anclada a la lógica de cosificar y valorar la reproducción social de la vida, consolida en una estructura jerárquica impuesta desde el Norte Global en función de sus beneficios y subordinando a los sures. Mientras la reproducción de la vida se asoma al borde del abismo, arrastra tras su mano la perpetuación de la lógica teleológica de acumulación de capital infinito.

El capitalismo ha erigido andamios de un escenario "enverdecido" sin alterar el guion de la obra. Sus respuestas, ahora envueltas en el ropaje ecológico, se presentan como soluciones a los mismos problemas que sus contradicciones han generado. No obstante, su metabolismo de producción y consumo, orientado exclusivamente a la ganancia, se acerca más al punto de no retorno frente a los límites biofísicos del planeta. Atenuando, pero no subvirtiendo la lógica de la acumulación, ofrece soluciones "verdes" que, en un mundo marcado por asimetrías entre el Norte y el Sur global, no hacen más que reafirmar el orden existente.

En la lógica del capitalismo del Norte global y su modo de vida imperial (Brand y Wissen, 2021), reproducido en los sures como una imitación forzada de la reproducción de la vida, su rostro se reviste de ecologismo sin alterar su fundamento teleológico de crecimiento, donde su orden productivo-consuntivo y la acumulación de capital siguen siendo su motor incansable. Las astutas estrategias del capitalismo por perpetuarse son desveladas en el libro *Más allá del colonialismo verde, Justicia global y*

¹ Lang, M., Bringel, B., y Manahan, M. A. (Eds.). (2024). Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: CLACSO; Plataformas para el Diálogo Social; Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador, 395 pp.

² Instituto de Investigaciones Económicas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Correo electrónico: lopezth6@gmail.com

geopolítica de las transiciones ecosociales (Lang *et al.*, 2024), al dismantelar los argumentos conceptuales de la retórica ambientalista del capital, desde una mirada crítica anticolonial. Entre los múltiples artículos que integran este volumen, se pueden identificar tres momentos clave que agrupan la cadena argumentativa de intelectuales/militantes sobre los problemas inherentes al colonialismo verde. Aventurándome a una generalidad con sentido exclusivamente explicativo, el libro, en un primer momento, aborda la transición energética y las propuestas de descarbonización y extractivismo verde impulsadas desde el norte global, enmarcadas en un contexto geopolítico y geoeconómico de disputa —entre el capitalismo occidental y el ascenso de la economía china— por los recursos estratégicos vitales para sus economías y su seguridad nacional. En segundo lugar, se ofrece un análisis crítico que revela la posición colonialista e imperial de la propuesta del norte sobre el sur, desvelando las implicaciones futuras de esa propuesta y los problemas que los sures enfrentan en su resolución. Finalmente, en un tercer momento, para evitar mantenernos en un panorama desalentador, el libro brinda una chispa de esperanza enunciando las alternativas construidas y en construcción que, en su devenir, se hacen y se rehacen a sí mismas. Estos tres momentos, aunque puedan leerse de manera aislada a través de los capítulos, en conjunto ofrecen la posibilidad de un freno de emergencia a la locomotora del capital —como advertiría Benjamin— (Benjamín, 2010).

Desde una perspectiva situada en el Sur global y dentro del marco de las asimetrías que estructuran la economía mundial, las prácticas ‘verdes’ del capitalismo intentan canalizar una transición energética sin alterar los cimientos fundamentales de un sistema que, durante siglos, ha encontrado estrategias para perpetuarse. Sin modificar sustancialmente el metabolismo social, las críticas recogidas en libro advierten que esta transición, impulsada por las élites del Norte global, no representa un cambio estructural profundo. Por el contrario, al encubrir las contradicciones inherentes al capitalismo bajo un discurso ambientalista, se refuerzan sus dinámicas depredadoras mediante una intensificación de la explotación de la naturaleza, ahora revestida bajo la lógica del extractivismo verde.

Bajo la promesa de promover energías “verdes”, se ocultan dinámicas que perpetúan la lógica extractiva del capitalismo sobre la naturaleza. Por un lado, la apropiación de tierras para la instalación de infraestructuras energéticas desplaza a comunidades que han gestionado históricamente su entorno a través de relaciones alternativas al mercado capitalista. Por otro, se reactiva un nuevo ciclo extractivo en la región, ahora enfocado en minerales estratégicos para la transición energética, como el litio, el cobre y el cobalto, elementos clave para la producción de energías renovables y baterías. En este contexto, la llamada “transición verde” del Norte global se traduce en un extractivismo acelerado en el Sur, que reproduce y profundiza los mecanismos de apropiación, despojo y reconfiguración territorial, afectando gravemente a las comunidades locales y sus saberes ancestrales.

El dominio empresarial y la búsqueda incesante de ganancia se disfraza bajo la promesa de la “transición verde”, pero en su núcleo persisten tres dinámicas fundamentales del capitalismo contemporáneo aplicadas a la naturaleza: la privatización, la mercantilización y, más recientemente, la finan-

ciarización. Las dos primeras han sido pilares históricos de la acumulación de capital, profundizadas en las últimas décadas mediante procesos de desposesión (Harvey, 2004) y apropiación (Moore, 2020). La tercera, cada vez más acentuada, despoja a la naturaleza de su materialidad, transformándola en un activo ficticio dentro de los principales mercados financieros, donde los especuladores juegan en el tablero de la economía de casino, buscando rentas diferenciales en un juego que amplía las fronteras de la acumulación, sin modificar las estructuras de expropiación y apropiación de la naturaleza y sus excedentes.

Por ello, en el libro se presentan las propuestas de autores y autoras que abogan por otros modelos energéticos, los cuales, a su vez, deben ir acompañados de una transformación del modelo productivo y de consumo impuesto por la modernidad occidental del capital. Frente a la producción acelerada de bienes concebidos para la obsolescencia y el consumo desmedido, estas propuestas abogan por la construcción de un entorno que favorezca un equilibrio social-natural. Un modelo que, en lugar de reproducir la lógica del capitalismo verde —con su metabolismo destructivo, sus asimetrías y su lógica colonizadora— se adentra en propuestas capaces de subvertir sus fundamentos y abrir caminos hacia formas de vida alternativas y justas.

Por ello, el libro nos invita a imaginar otras transiciones justas que no se traduzcan en un mayor extractivismo para la región, ni que se impongan de manera jerárquica, colonial o unidireccional. No se trata de someter al Sur a los dictámenes de un ecologismo que busca únicamente generar ganancias. El llamado es a mirar las posibilidades de transitar fuera de este capitalismo depredador desde diversas perspectivas, hacia formas alternativas de organización de la reproducción social, donde la vida, las formas colectivas, anticoloniales y antipatriarcales de convivencia, sean colocadas en el centro. Este proceso implica desmercantilizar y descolonizar la reproducción de la vida social bajo el yugo del capital, descosificar los encuentros entre los seres humanos y entre estos y la naturaleza, liberándonos de la significación dominante colonial e imperial.

Así, el libro no solo desmonta las ilusiones de una transición energética justa desde el Norte Global, sino que también dibuja senderos posibles desde los márgenes, allí donde la resistencia se transforma en propuesta. Entre las críticas al colonialismo verde y las prácticas emergentes desde los territorios, el texto se erige como una brújula para imaginar otros futuros. En sus páginas, la transición no es un decreto desde arriba, sino una construcción colectiva que germina desde abajo, donde la justicia, la democracia y la representación no son adornos retóricos, sino cimientos de un horizonte más digno y habitable.

BIBLIOGRAFÍA

- Benjamín, W. 2010. Tesis sobre la historia y otros fragmentos. Editorial ITACA, Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
- Brand, U., & Wissen, M. (Eds.). 2021. *Modo de vida imperial. Vida cotidiana y crisis ecológica del capitalismo*. Tinta Limón.
- Harvey, D. 2004. *El nuevo imperialismo*. Ediciones Akal.
- Lang, M., Bringel, B., y Manahan, M. A. (Eds.). 2024. *Más allá del colonialismo verde: Justicia global y geopolítica de las transiciones ecosociales*. Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Ecuador; CLACSO. <http://hdl.handle.net/10644/9799>
- Moore, J. 2020. *El capitalismo en la trama de la vida. Ecología y acumulación de capital*. Traficantes de sueños.

Multicrisis, agricultura y seguridad alimentaria en Centroamérica: una aproximación a su estudio¹

Adriana Moreno Blanco²

El libro, publicado en la colección *Avances de Investigación CIHAC (Centro de Investigaciones Históricas de América Central)* en colaboración con CALAS (Centro Maria Sibylla Merian de Estudios Latinoamericanos Avanzados), analiza de forma integral el fenómeno de las multicrisis en Centroamérica y su impacto en la agricultura y la seguridad alimentaria. Su objetivo principal es examinar cómo la convergencia de crisis climáticas, económicas, sanitarias (como la pandemia de COVID-19) y políticas ha intensificado la vulnerabilidad de los sistemas agrícolas y agravado la inseguridad alimentaria en cinco países: Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica.

El documento está organizado en secciones claramente delimitadas que permiten una comprensión progresiva del fenómeno. Comienza con una introducción que contextualiza el problema y expone los objetivos del estudio, seguida de un marco conceptual donde se definen términos clave como “multicrisis”, “resiliencia” y “seguridad alimentaria”. Luego, se analizan las particularidades del istmo centroamericano, con énfasis en el Corredor Seco y los rasgos socioeconómicos de la región.

Posteriormente, se examinan en detalle las distintas crisis (climáticas, deforestación, COVID-19 y precios agrícolas), su impacto sobre el modelo agrícola bimodal y la vulnerabilidad estructural del sector. Finalmente, se evalúa la situación de la seguridad alimentaria mediante datos estadísticos y se proponen estrategias de resiliencia y sostenibilidad. El documento concluye con agradecimientos y una extensa bibliografía. Esta estructura favorece una comprensión integral del problema, desde los fundamentos teóricos hasta las propuestas de solución.

¹ Álvarez A. y Cárcamo R., 2025. Multicrisis, agricultura y seguridad alimentaria en Centroamérica: una aproximación a su estudio, CALAS-CIHAC, San José Costa Rica.

² Consultora internacional. Correo electrónico: aymorenoblanco@gmail.com

El marco teórico establece una base conceptual sólida para el análisis de las multicrisis, definiéndolas como fenómenos interconectados, de origen exógeno o endógeno, que pueden manifestarse de manera súbita o gradual, con impactos locales o sistémicos. Con base en el concepto de resiliencia —entendida como la capacidad dinámica de absorción, adaptación y transformación frente a las crisis— el enfoque integra las cuatro dimensiones tradicionales de la seguridad alimentaria (disponibilidad, acceso, estabilidad y utilización) junto con dos pilares emergentes: la agencia (participación comunitaria) y la sostenibilidad. Este enfoque multidimensional permite analizar cómo eventos como el cambio climático, las pandemias o las crisis económicas interactúan y agravan las vulnerabilidades estructurales existentes. El marco teórico destaca la necesidad de respuestas políticas que combinen medidas inmediatas (como la asistencia alimentaria) con transformaciones sistémicas (como la transición agroecológica), prestando especial atención a los impactos diferenciados sobre mujeres y población rural.

Desde el punto de vista metodológico, el estudio adopta un enfoque mixto que combina técnicas cualitativas (revisión documental sistemática, análisis de contenido y estudios de caso) con análisis cuantitativos basados en indicadores socioeconómicos y series históricas. Las principales fuentes utilizadas fueron secundarias, provenientes de organismos internacionales (FAO, WFP, CEPAL, Banco Mundial) y de institutos nacionales de estadística (2013–2023). Esta metodología permitió triangular información y realizar análisis comparativos regionales, aunque presenta limitaciones importantes. Entre ellas, la ausencia de datos primarios (encuestas propias o trabajo de campo), las restricciones presupuestarias que afectaron el alcance territorial del análisis, la heterogeneidad en la calidad de los datos nacionales —especialmente en Nicaragua— y la dificultad de aislar los efectos específicos de crisis que ocurrieron simultáneamente. Estas limitaciones reducen la capacidad de capturar estrategias locales de resiliencia y realizar análisis subnacionales detallados, aunque el enfoque adoptado constituye una base firme para futuros estudios más contextualizados.

En cuanto al diagnóstico regional, el documento destaca que Centroamérica enfrenta un panorama crítico, caracterizado por profundas vulnerabilidades estructurales que agravan el impacto de múltiples crisis interrelacionadas. La economía de la región sigue siendo altamente dependiente del sector agrícola, que representa entre el 12.9% del PIB en Honduras y el 15.8% en Nicaragua. Este modelo se basa en una estructura bimodal, con una agroexportación tecnificada y una agricultura familiar precaria, que opera en minifundios de entre 1.3 y 2.8 hectáreas. Esta dualidad coexiste con alarmantes indicadores socioeconómicos: niveles de pobreza del 67.8% en Honduras, el 49% de los hogares en Guatemala sin capacidad para cubrir la canasta básica alimentaria y una informalidad laboral del 71% en este último país. A ello se suma una débil inserción en los mercados globales, siendo la región importadora neta de alimentos e insumos agrícolas.

Estas condiciones se ven agravadas por cuatro crisis fundamentales que interactúan entre sí: (1) eventos climáticos extremos recurrentes, que afectan principalmente al Corredor Seco, donde el 60% de la población rural depende de cultivos de subsistencia; (2) acelerados procesos de deforestación,

con una pérdida del 88% de la cobertura boscosa en Nicaragua entre 1990 y 2020; (3) el impacto multidimensional de la pandemia de COVID-19, que incrementó la pobreza en un 21% en Honduras y (4) el alza en los precios de alimentos e insumos agrícolas, con aumentos de hasta el 139% en el costo de los fertilizantes en El Salvador.

La convergencia de estos factores ha provocado un deterioro severo de los pilares de la seguridad alimentaria, especialmente en las dimensiones de acceso y estabilidad. La inseguridad alimentaria grave afecta al 23.5% de la población en Honduras y al 21.1% en Guatemala, con notables disparidades de género (17.5% en mujeres frente al 14.6% en hombres) y territoriales. Esta situación confirma la validez del marco de resiliencia dinámica, evidenciando las limitadas capacidades institucionales y comunitarias para absorber (por ejemplo, a través de programas sociales), adaptarse (mediante diversificación productiva) o transformarse (a través de políticas agrarias integrales).

Ante este panorama, el documento propone implementar estrategias integrales que combinen: (1) medidas inmediatas de absorción (como la ampliación de redes de protección social); (2) procesos de adaptación sistémica (por ejemplo, la diversificación productiva y sistemas de alerta temprana) y (3) transformaciones estructurales profundas (como reformas agrarias y la transición agroecológica). Todo ello debe articularse fortaleciendo los pilares de agencia (participación comunitaria efectiva) y sostenibilidad (manejo forestal responsable y prácticas agrícolas regenerativas), superando soluciones sectoriales fragmentadas y atacando las causas estructurales de la inseguridad alimentaria.

El documento concluye que los datos reflejan no solo las limitaciones institucionales para implementar políticas efectivas de absorción, sino también la ausencia de estrategias sólidas de adaptación productiva y transformación estructural. Abordar esta multicrisis exige un enfoque sistémico que articule respuestas inmediatas con reformas profundas, priorizando la gobernanza participativa, la sostenibilidad ambiental y la reducción de desigualdades estructurales como condiciones esenciales para construir resiliencia alimentaria en la región.

Entre las principales contribuciones del documento se destacan tres: 1) la articulación teórico-metodológica que vincula el enfoque de resiliencia dinámica con el análisis estructural de vulnerabilidades, superando enfoques sectoriales fragmentados; 2) la evidencia empírica robusta que cuantifica los impactos acumulativos de las crisis climáticas, económicas y sanitarias sobre la seguridad alimentaria, identificando patrones territoriales y de género hasta ahora poco documentados y 3) la propuesta de soluciones estratificadas que combinan acciones inmediatas (protección social), de mediano plazo (diversificación productiva) y estructurales (reformas agrarias). Estas aportaciones tienen relevancia más allá del ámbito académico, ya que ofrecen insumos clave para la formulación de políticas públicas centradas en tres pilares críticos: a) mecanismos de gobernanza multinivel para gestionar crisis superpuestas; b) cierre de brechas entre el sector agroexportador y la agricultura familiar y c) enfoque transversal de sostenibilidad ambiental y equidad de género en las estrategias de resiliencia.

A pesar de su solidez, la investigación presenta algunas limitaciones. En primer lugar, la falta de datos desagregados y consistentes para Nicaragua en indicadores clave limita la comparabilidad regional. En segundo lugar, el enfoque regional, si bien útil para identificar patrones generales, puede ocultar particularidades locales relevantes, especialmente en zonas indígenas o fronterizas. Finalmente, aunque se proponen estrategias de resiliencia basadas en el marco de absorción-adaptación-transformación, estas carecen de mayor desarrollo operativo en cuanto a financiamiento, escalabilidad y articulación interinstitucional.

Estas limitaciones no invalidan los hallazgos del estudio, pero sí subrayan la necesidad de investigaciones complementarias que: 1) generen datos primarios en vacíos críticos; 2) incorporen enfoques subregionales con perspectiva etnográfica y 3) desarrollen pilotos de intervención para evaluar la viabilidad práctica de las propuestas.

En definitiva, este documento constituye una contribución fundamental al análisis de las multicrisis en Centroamérica. Su enfoque holístico, que integra dimensiones económicas, ambientales y sociales, le confiere un triple valor: (1) para la academia, como marco teórico innovador; (2) para los tomadores de decisiones, como diagnóstico con propuestas aplicables a corto, mediano y largo plazo y (3) para la cooperación internacional, como guía para definir prioridades técnicas y financieras. Su mayor fortaleza reside en mostrar cómo las crisis superpuestas interactúan con desigualdades estructurales —especialmente en el Corredor Seco y entre la población rural— ofreciendo así una referencia clave para el diseño de políticas que combinen respuesta inmediata y transformación estructural frente a la inseguridad alimentaria.

Guía para autores

Los manuscritos que se presenten a esta Revista deben ser resultado de investigaciones de alto nivel académico, aportar conocimiento original, ser inéditos y de preferencia deben estar escritos en español.

Lista de comprobación para la preparación de envíos

Como parte del proceso de envío, los autores/as deben comprobar que su envío cumpla todos los elementos que se muestran a continuación. De lo contrario, serán devueltos.

- ⇒ El envío no ha sido publicado previamente ni se ha sometido a consideración a ninguna otra revista (o se ha proporcionado una explicación al respecto en la postulación dirigida al editor/a).
- ⇒ Siempre que sea posible, se proporcionan direcciones URL y DOI's para las referencias.
- ⇒ En el texto se utilizará el procesador de Microsoft Word, con fuente Arial a 12 puntos, a 1.5 espacio. Se utiliza cursiva en lugar de subrayado (excepto en las direcciones URL); y todas las ilustraciones, figuras y tablas se encuentran colocadas en los lugares apropiados del texto, en vez de al final.
- ⇒ El texto se adhiere a los requisitos estilísticos y bibliográficos resumidos en los siguientes principios editoriales.

Tipo de contribución

1. Artículos de investigación
2. Notas de investigación
3. Ensayos y revisiones bibliográficas
4. Reseñas de libros y comentarios

Los *Artículos de investigación* deben reportar resultados de investigaciones originales y no haber sido entregados para su publicación en cualquier otro medio. Para ser considerados los artículos deben establecer claramente el argumento que van a sostener enmarcado en una discusión relevante en el campo o subcampos de estudio, establecer la metodología utilizada, presentar una discusión de la literatura existente orientada a enmarcar los aportes del estudio y presentar los resultados obtenidos en la investigación empírica de manera consistente con el argumento y el diseño metodológico.

La estructura básica de los artículos es la siguiente:

Introducción
Método de trabajo
Resultados
Discusión
Conclusiones e implicaciones

Para los artículos la extensión máxima es de ocho mil palabras (aproximadamente 30 cuartillas incluyendo cuadros, figuras, notas y bibliografía).

Las *Notas de investigación* contienen una descripción concisa y completa de una investigación limitada o con resultados significativos pero parciales. Debe estar completamente documentada por referencias bibliográficas y describir la metodología empleada como en un artículo de investigación. No deberá exceder las cuatro mil palabras (aproximadamente 15 cuartillas, incluyendo figuras, cuadros y referencias).

Los *Ensayos y revisiones bibliográficas* deben incluir un tema de interés actual y relevante. Pueden dar cuenta de discusiones teóricas y metodológicas relevantes en campos inherentes a la revista. Dado el énfasis en la discusión conceptual y metodológica no necesitan presentar evidencia empírica original. Para su consideración es importante que presenten de manera clara los aportes conceptuales y metodológicos que realizan al campo o subcampos en el que se inscriben. Estos trabajos no deben exceder las cinco mil palabras (aproximadamente 20 cuartillas incluyendo cuadros, figuras, notas y bibliografía).

Las *Reseñas de libros* tienen por objetivo la crítica de un texto publicado no más allá del año anterior al envío del manuscrito en cualquiera de las disciplinas que aborda la revista. Es importante destacar que en las reseñas se busca un análisis crítico de la obra revisada, así como su contextualización e identificación de los principales aportes. Las reseñas no deben exceder de dos mil caracteres (alrededor de seis cuartillas).

Presentación de textos

La presentación implica que todos los autores autorizan la publicación del documento y que están de acuerdo con su contenido. Al aceptar el artículo la revista puede cuestionar al (las, los) autor (as, es) para transferir el derecho de su artículo a la editorial.

Los trabajos para consideración pueden ser enviados en archivo electrónico. Se enviará en documento de Word como un archivo adjunto al correo electrónico aalvarez@correo.xoc.uam.mx. Mediante la misma vía se realizará el acuse de recibo.

Archivo electrónico

Se enviará el trabajo en archivo digital, con cuatro márgenes de 2.5 centímetros. Las cuartillas deberán estar numeradas.

Preparación y consideraciones generales para el manuscrito:

1. El texto deberá ser escrito en español o inglés.
2. El texto deberá tener el siguiente orden:
 - Título (Claro, descriptivo y corto).
 - Nombre del (las, los) autor (as, es).
 - Teléfono, correo electrónico y fax del primer autor o autor de correspondencia para mantener comunicación con el Editor.
 - Dirección actual del (las, los) autor (as, es).
 - Resumen y 5 a 6 palabras claves (términos indexados).
 - Abstract and 5 to 6 keywords
 - Introducción.
 - Descripción del área, métodos y técnicas.
 - Resultados.
 - Discusión.
 - Conclusión.

- Agradecimientos y reconocimientos. Siempre que corresponda, se reconocerán colaboraciones como a) ayuda técnica recibida; b) apoyo financiero y material, especificando la índole de este; c) las relaciones financieras que pudieran suscitar un conflicto de intereses. Las personas que colaboraron pueden ser citadas por su nombre, añadiendo su función o tipo de colaboración. Siempre que corresponda, los autores deberán mencionar si existe algún conflicto de interés.
- Referencias.
- Cuadros.
- Mapas u otros anexos.

El título y subtítulo deberán estar en líneas diferentes sin sangrías. Se utilizarán altas y bajas; se escribirá con mayúsculas el carácter inicial y los nombres propios. El título debe ser descriptivo en español e inglés, corresponder al contenido del artículo y tener una extensión máxima de 55 caracteres (alrededor de diez palabras).

La primera vez que aparezca una sigla o un acrónimo debe escribirse *in extenso* con el acrónimo o siglas entre paréntesis.

Se recomienda evitar el uso de palabras en idioma distinto al español y de neologismos innecesarios.

Si es inevitable emplear un término en lengua extranjera (por no existir una traducción apropiada), se debe anotar, entre paréntesis o como nota de pie de página, una breve explicación o traducción aproximada del término.

Se deben utilizar unidades del Sistema Internacional (SI).

Resumen

El resumen deberá ser claro, descriptivo y contener no menos de 800 ni más de 900 caracteres sin considerar los espacios. Es conveniente incluir en el resumen los objetivos, resultados más relevantes, así como las principales conclusiones.

Abstract

Se trata de la traducción del resumen al inglés y, eventualmente, al francés. La calidad de las traducciones será responsabilidad exclusiva de las y los autores.

Cuadros

1. El autor deberá tener en cuenta las limitaciones en tamaño y presentación de la revista. Deberán evitarse cuadros largos, y exceder las dimensiones de una cuartilla (21 x 27.9 centímetros).
2. Los cuadros se enumeran de acuerdo con su secuencia en el texto y en números arábigos. Se debe incluir la fuente en todos los cuadros.
3. Los cuadros se encontrarán insertos en el lugar previsto por las y los autores dentro del texto.
4. Cada cuadro debe tener un título corto y autoexplicativo. El tipo de letra deberá ser el mismo que el utilizado en el texto (arial, 12 pts.) y colocarse al centro y arriba.
5. Los cuadros elaborados deberán ser propios con base en la información generada por los (as) autores (as). Si llegasen a utilizar información secundaria, deberá darse el crédito correspondiente a la fuente utilizada.

Ilustraciones

1. Todas las ilustraciones (mapas, líneas de dibujo y fotografías) deberán incluirse en el texto, sin marco y ajustarse al tamaño de una cuartilla (21 x 27.9 cm).
2. Las ilustraciones deberán ser secuenciadas con números arábigos de acuerdo con el texto. Las referencias deben incluirse en el texto para cada ilustración.
3. Las ilustraciones que contengan texto deberán estar en *Indian ink* o en etiquetas impresas. Asegurarse que el tamaño del carácter sea lo suficientemente grande para permitir una reducción del 50% sin volverse ilegible. Los caracteres deberán estar de preferencia en español, aunque se puede justificar su inclusión en inglés. Usar el mismo tipo de carácter y estilo de la revista.
4. Cada ilustración debe tener una leyenda.
5. Las fotografías sólo son aceptables si tienen un buen contraste e intensidad. Las copias deben ser nítidas y brillantes. Pueden incluirse ilustraciones en color.

Referencias

La bibliografía se incorpora al final del artículo, incluyendo en orden alfabético todas las obras citadas en el texto y en los pies de página. Los autores deben revisar cuidadosamente que no haya omisiones ni inconsistencias entre las obras referenciadas y la bibliografía. Se enlistará la obra de un mismo autor en orden descendente por fecha de publicación (2022, 2018, 2014, etcétera).

Se dará prioridad a los artículos enviados con la bibliografía gestionada electrónicamente, y presentada con la norma APA7 (<https://normas-apa.org/wp-content/uploads/Guia-Normas-APA-7ma-edicion>).

pdf). Los autores podrán recurrir al uso de cualquier gestor disponible en el mercado (Reference Manager, Crossref o Mendeley entre otros), o de código abierto tal como Refworks o Zotero.

Dentro del texto, al referirse a un autor (as, es) deberá hacerse sin inicial seguido del año de publicación y, de ser necesario, por una referencia corta sobre las páginas. Ejemplo: “Desde que Martínez (2024) demostró que...”, “Esto coincide con resultados posteriores (Norman, 2025: 20-21)”.

Si la referencia que se indica en el texto es escrita por más de dos autores, el nombre del primer autor será seguido por *et al.* o “y colaboradores”.

Esta indicación, sin embargo, no deberá ser usada en la lista de referencias ni en itálicas.

Usar el siguiente sistema para indicar las referencias:

a. De publicación periódica

Castañeda Naranjo, L. A. y Palacios Neri, J. (2015). Nanotecnología: fuente de nuevos paradigmas. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 7(12), 45-49.

b. Seminarios, Congresos, Simposios o Conferencias

Sánchez, C., Ayala, D. y Bocarosa, E. (17-29 de noviembre de 2018). *La biodiversidad y la supervivencia humana en la tierra* [Discurso principal]. Conferencia de las Naciones Unidas, Sharm, El-Sheikh, Egipto.

c. De libros

Libro impreso

Apellido, N. (año). Título del trabajo. Editorial.

Libro en línea

Apellido, N. y Apellido, N. (año). Título del libro. Editorial. DOI o URL

Libro con editor

Apellido, N. (Ed.). (año). Título del trabajo. Editorial.

d. De un capítulo en libro

Muñoz, O. (1991). El proceso de industrialización: teorías, experiencias y políticas. En O. Sunkel (Comp.), *El desarrollo desde dentro* (pp. 184-206). Lecturas, núm. 71. Fondo de Cultura Económica.

d. Leyes y documentos legales

Ley 1060 de 2006. Por la cual se modifican las normas que regulan la impugnación de la paternidad y la maternidad. 26 de julio de 2006. D.O. No. 46341.

e. De tesis o disertaciones

Martínez Ribón, J. G. T. (2011) *Propuesta de metodología para la implementación de la filosofía Lean (construcción esbelta) en proyectos de construcción* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <http://bdigital.unal.edu.co/10578/>

f. Páginas web

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1 de octubre de 2018). *Nuevos datos revelan que en el mundo uno de cada tres adolescentes sufre acoso escolar*. <https://es.unesco.org/news/nuevos-datosrevelan-que-mundo-cada-tres-adolescentes-sufre-acoso-escolar>.

g. Archivo PDF

Rodríguez, R. (2019). *Una guía para combatir el Acoso escolar* [Archivo PDF]. <https://www.url.com>. Para otras opciones consultar: <https://normas-apa.org/wp-content/uploads/Guia-Normas-APA-7ma-edicion.pdf>.

Fórmulas

1. Las fórmulas deberán ser escritas de acuerdo con los estándares de la revista. Dejar un espacio amplio alrededor de las fórmulas.
2. Los subíndices y superíndices deberán ser claros.
3. Los caracteres griegos y otros no latinos o símbolos escritos a mano deberán ser explicados e indicar su significado al margen de la página en donde aparecen por primera vez. Tener especial cuidado para mostrar claramente la diferencia entre un cero (0) y el carácter O y entre el 1 y el carácter I.
4. Para indicar fracciones simples, utilizar la diagonal (/) en lugar de una línea horizontal.
5. Enumerar, en paréntesis, las ecuaciones a la derecha. En general, sólo las ecuaciones explícitamente referidas en el texto, necesitan ser numeradas..
6. Se recomienda el uso de fracciones en lugar de signos de raíz.
7. Los niveles de significancia estadística que son mencionados sin más explicación son $P < 0.05 = *$, $P < 0.01 = **$ y $P < 0.001 = ***$
8. En las fórmulas químicas, las valencias de los iones deberán indicarse, por ejemplo, como Ca^{2+} y no como Ca^{++} .

Pie de página

1. Se recomienda hacer los pies de página a través de un procesador de textos.
2. En caso de utilizarlos, deberán numerarse en el texto, indicando el número como superíndice y que sean tan cortos como sea posible. El tamaño del carácter será de 10 pts.

Nomenclatura

1. Los autores y editores aceptarán las normas de nomenclatura biológica vigente.
2. Todos los seres vivos (cultivos, plantas, insectos, aves, mamíferos, etc.) deberán ser identificados por sus nombres científicos, con excepción del nombre común de animales domésticos.
3. Todos los seres vivos y otros compuestos orgánicos deberán ser identificados por sus nombres genéricos cuando son mencionados por primera vez en el texto. Los ingredientes activos de todas las formulaciones deberán ser igualmente identificadas.

Derechos de autor

1. Cuando el autor cite algún trabajo de otra persona o reproduzca una ilustración o tabla de un libro o artículo de revista debe estar seguro de no estar infringiendo los derechos de autor.
2. Aunque en general un autor puede citar de otro trabajo publicado, debe obtener permiso del poseedor del derecho de autor si se requiere reproducir tablas, figuras u otras ilustraciones.
3. El material en trabajos no publicados o protegidos, no podrá ser publicado sin obtener el permiso por parte del poseedor de los derechos.
4. Deberá incluirse un agradecimiento por algún material autorizado para su publicación.

De acuerdo con la legislación de derechos de autor, *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* reconoce y respeta el derecho moral de los autores, así como la titularidad del derecho patrimonial, el cual será cedido a la revista para su difusión en acceso abierto. *Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente* no realiza cargos monetarios a los autores por enviar y procesar artículos para su publicación. Todos los textos publicados en la Revista, sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0* Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional), que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.

Para todo lo anterior, el o los autores (as) deben remitir el formato de Carta-Cesión de la Propiedad de los Derechos de la primera publicación debidamente requisitado y firmado por el autor(es). Este formato se puede enviar por correo electrónico en archivo pdf al correo: aalvarez@correo.xoc.uam.mx (Carta-Cesión de Propiedad de Derechos de Autor).

Criterios de dictaminación y pruebas del formato del trabajo

1. Una vez revisado, conforme a las políticas de la revista, cada texto será sometido para su dictamen por al menos a dos revisores miembros del Comité Editorial, quienes desconocerán el nombre e Institución de los autores proponentes. Para ser publicado cada trabajo deberá contar con dos dictámenes aprobatorios.
2. Si el documento cuenta con observaciones, se regresará el texto para la corrección. Una vez realizadas las correcciones conforme a los criterios de evaluación del Comité Editorial de la revista, se enviará una prueba de formación al autor correspondiente. Sólo los errores tipográficos serán corregidos; no se harán cambios o adiciones al documento.
3. Los trabajos no aceptados para su publicación se regresarán al autor, con una exposición de los motivos por los que se rechaza o las modificaciones que deberán aplicarse para ser reevaluados.

Periodicidad

Es una publicación semestral que aparece los meses de julio y diciembre de cada año.

Declaración de privacidad

Los nombres y las direcciones de correo electrónico introducidos en esta revista se usarán exclusivamente para fines establecidos en ella y no se proporcionarán a terceros para su uso con otros fines.

Sociedades Rurales, Producción y Medio Ambiente.

Revista electrónica

Se terminó de formar en julio de 2025