MÉTODOS Y ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN DE AFLATOXINAS B1 (AFB1) EN LA ALIMENTACIÓN DE VACAS LECHERAS EN LA REGIÓN DEL CESAR: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA.

Modalidad monografía

Propuesta de trabajo de grado para la obtención del título de:

INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Autores:

Karol Yixeli Acero Torres

Marcos José Capataz Meza

Directora:

Belkis Diaz Basto

Codirector:

Isaac Dodino Duarte

Universidad Popular Del Cesar Seccional Aguachica

Departamento De Ciencias Agroindustriales

Programa De Ingeniería Agroindustrial

Aguachica - Cesar

3 de septiembre de 2026

1. INTRODUCCIÓN

Las aflatoxinas han causado cierta problemática en el sector agroindustrial y la salud animal. Esto representa desafíos tanto para la salud como para la seguridad alimentaria. Las aflatoxinas son micotoxinas producidas principalmente por cepas aflatoxigénicas de hongos como Aspergillus flavus y Aspergillus parasiticus, capaces de contaminar diferentes materias primas agrícolas y alimentos destinados al ganado lechero (Pichardo-Matamoros y Elizondo-Salazar, 2020). Su presencia representa un riesgo para la inocuidad alimentaria, debido a que la aflatoxina B1 (AFB1), al ser ingerida por las vacas, puede metabolizarse en el hígado y transformarse parcialmente en aflatoxina M1 (AFM1), la cual posteriormente se excreta a través de la leche (Tarazona-Manrique et al., 2020).

A nivel internacional, la contaminación por aflatoxinas representa una preocupación para la inocuidad de la cadena láctea, debido a que estas micotoxinas pueden ingresar al organismo de las vacas mediante el consumo de alimentos contaminados. La aflatoxina B1 (AFB1) puede ser metabolizada en el hígado de los rumiantes y transformarse parcialmente en aflatoxina M1 (AFM1), la cual posteriormente es excretada en la leche. Asimismo, la estabilidad de la AFM1 frente a tratamientos térmicos convencionales dificulta su eliminación durante el procesamiento lácteo. Por esta razón, resulta fundamental implementar estrategias de prevención, monitoreo y control de aflatoxinas desde la producción y el almacenamiento de los piensos, con el propósito de reducir los riesgos para la salud de los consumidores (Reyna-Gallegos and Arteaga, 2022).

En Colombia, la contaminación por aflatoxinas constituye un riesgo potencial para la inocuidad de la cadena láctea, debido a que la ingesta de alimentos contaminados con aflatoxina B1 (AFB1) puede ocasionar la presencia de aflatoxina M1 (AFM1) en la leche. En este contexto, el departamento del Cesar representa una región de interés para el análisis de estrategias de prevención y mitigación, especialmente por las condiciones de temperatura, humedad y almacenamiento que pueden influir en la calidad de los piensos destinados al

ganado lechero. Por consiguiente, resulta pertinente revisar las estrategias de control documentadas en la literatura científica y considerar su posible aplicación en los sistemas de producción láctea de esta región

(Reyna-Gallegos y Arteaga, 2022).

Entre las estrategias utilizadas para mitigar los efectos de la aflatoxina B1 (AFB1) en el ganado lechero se encuentra la incorporación de adsorbentes minerales, como la bentonita, en la alimentación animal. Estos compuestos pueden unirse a la AFB1 en el tracto gastrointestinal, disminuyendo su biodisponibilidad y absorción en el organismo. Asimismo, la selección de materias primas de buena calidad y la implementación de prácticas adecuadas de manejo y almacenamiento de los forrajes constituyen medidas preventivas para reducir el riesgo de contaminación por hongos aflatoxigénicos Según Juárez y otros (2019).

Entre las estrategias biológicas para la mitigación de aflatoxinas se ha investigado el uso de determinados microorganismos probióticos, debido a su posible capacidad para disminuir la biodisponibilidad de la aflatoxina B1 (AFB1) mediante mecanismos como la adsorción a componentes de la superficie celular (Basso et al., 2020). Sin embargo, la eficacia de estos procesos depende del microorganismo empleado, sus características y las condiciones de aplicación, por lo que es necesario contar con evidencia científica específica que respalde su utilización en la alimentación del ganado lechero. Asimismo, las buenas prácticas de manejo y almacenamiento de granos y forrajes, especialmente el control de la humedad y la temperatura, constituyen medidas preventivas fundamentales para reducir el riesgo de contaminación por hongos aflatoxigénicos.

1.1. JUSTIFICACIÓN.

Las aflatoxinas, especialmente la aflatoxina B1 (AFB1), representan una amenaza para la inocuidad alimentaria y la salud pública debido a su posible presencia en materias primas y alimentos destinados al ganado lechero. Cuando las vacas consumen piensos contaminados con AFB1, esta micotoxina es metabolizada principalmente en el hígado mediante enzimas del sistema citocromo P450 (CYP450), dando lugar a la formación de aflatoxina M1 (AFM1), un metabolito hidroxilado que posteriormente puede ser excretado a través de la leche(Sumeyra Sevim, 2024). La presencia de AFM1 en los productos lácteos representa un riesgo para la salud de los consumidores, especialmente ante exposiciones prolongadas, debido a sus propiedades tóxicas y carcinogénicas (Onesmo et al., 2024).

Desde la perspectiva de la ingeniería agroindustrial, la presencia de aflatoxina M1 (AFM1) en la leche constituye un desafío para la gestión de riesgos químicos y la inocuidad alimentaria. Según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, 1993) ha clasificado tradicionalmente la AFM1 dentro del Grupo 2B, correspondiente a agentes posiblemente carcinógenos para los seres humanos, a diferencia de la AFB1, clasificada en el Grupo 1. Asimismo, la AFM1 presenta una considerable estabilidad frente a tratamientos térmicos convencionales, como la pasteurización, lo que dificulta su eliminación durante el procesamiento lácteo. Por esta razón, resulta fundamental implementar estrategias preventivas y protocolos de monitoreo desde la producción y el almacenamiento de los piensos destinados al ganado lechero.

En el marco normativo colombiano, la Resolución 4506 de 2013 del Ministerio de Salud y Protección Social establece un límite máximo de 0,5 μg/kg de aflatoxina M1 (AFM1) en la leche, valor equivalente al nivel de acción establecido por la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) (Velarde Escobar et al., 2023; Tarazona-Manrique

et al., 2020). Por su parte, la Unión Europea, mediante el Reglamento (UE) 2023/915, establece un límite máximo de 0,050 μg/kg para la leche cruda, la leche tratada térmicamente y la destinada a la elaboración de productos lácteos. Esta diferencia normativa evidencia la importancia de fortalecer los sistemas de prevención, monitoreo y trazabilidad en la cadena de producción láctea, especialmente mediante el control de la aflatoxina B1 (AFB1) en los piensos destinados al ganado lechero, con el propósito de garantizar la inocuidad alimentaria y favorecer el cumplimiento de los estándares de calidad nacionales e internacionales (Ministerio de Salud y Protección Social, 2013; FDA, 2005; Comisión Europea, 2023).

En relación con la alimentación animal, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), mediante la Directiva Técnica DIP-30-100-002 de 1999 cuya actualización es la Resolución 061252 de 2020, estableció niveles máximos permisibles de aflatoxinas en alimentos destinados a diferentes especies animales, fijando para la especie bovina un valor de 50 partes por billón (ppb), equivalente a 50 µg/kg de alimento. Esta disposición constituye una referencia importante para el control de micotoxinas en la alimentación bovina. En el caso de las vacas lecheras, la prevención de la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) adquiere especial relevancia debido a su posible transformación metabólica en aflatoxina M1 (AFM1), la cual puede excretarse en la leche. Por ello, resulta fundamental fortalecer las prácticas de selección, almacenamiento y control de calidad de las materias primas utilizadas en la formulación de piensos (Instituto Colombiano Agropecuario *(ICA, 2020).*

Por lo tanto, la presente investigación se justifica en la necesidad de identificar y analizar, mediante una revisión sistemática de literatura científica, los métodos y estrategias disponibles para mitigar la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) en los piensos destinados a vacas lecheras. Este análisis permitirá reconocer alternativas de prevención y control que puedan considerarse en los sistemas de producción láctea, teniendo en cuenta las condiciones agroclimáticas de la región del Cesar, donde factores como la temperatura y la humedad pueden favorecer el desarrollo de hongos aflatoxigénicos cuando existen condiciones inadecuadas de manejo y almacenamiento. De esta manera, se busca aportar información científica que contribuya al fortalecimiento de las prácticas de alimentación animal y a la protección de la inocuidad de la cadena láctea.

¿Cuáles son los métodos y estrategias más efectivos para mitigar la presencia de aflatoxina B1 en la alimentación de vacas lecheras?

Al abordar este tema, se analiza la eficacia de métodos físicos, químicos y biológicos, así como en la identificación de las mejores prácticas de manejo que pueden implementarse para la manipulación adecuada del alimento bovino para la minimización de la presencia de

aflatoxinas. (Tekin y Leblebici, 2022)

1.2. OBJETIVOS.

1.2.1. Objetivo General

Analizar los métodos de mitigación disponibles para la reducción de aflatoxina B1 en la alimentación de vacas lecheras para la minimización de los niveles de aflatoxina M1 en la leche.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Describir las principales causas de contaminación por aflatoxina B1 de los piensos destinados para la alimentación de vacas productoras de leche.
- Identificar métodos químicos, biológicos y físicos utilizados para la mitigación de aflatoxina B1 en la alimentación animal.
- Analizar las estrategias analíticas y de monitoreo utilizadas para la detección y control de aflatoxina B1 en piensos y leche.

1.3. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.

La contaminación por aflatoxinas, especialmente por aflatoxina B1 (AFB1), constituye una problemática de interés científico debido a sus efectos tóxicos y carcinogénicos, así como a los riesgos que representa para la salud pública y la inocuidad alimentaria. La presencia de esta micotoxina en materias primas y piensos destinados a la alimentación animal ha impulsado investigaciones orientadas a identificar los factores que favorecen su producción y las estrategias para prevenir y mitigar su contaminación. En el caso del ganado lechero, la ingestión de alimentos contaminados con AFB1 puede ocasionar su transformación metabólica en aflatoxina M1 (AFM1), la cual posteriormente puede excretarse a través de la leche, representando un riesgo para los consumidores de productos lácteos (Liu et al., 2022). Esta problemática adquiere relevancia para los sistemas de producción lechera de la región del Cesar, donde resulta importante considerar las condiciones de manejo y almacenamiento de los piensos como parte de las estrategias preventivas. En este contexto, Díaz Basto et al. (2024) evaluaron la presencia de hongos del género Aspergillus en piensos destinados al ganado durante la época de sequía en Aguachica, Cesar, lo que constituye un antecedente regional relevante y refuerza la necesidad de vigilar las condiciones de almacenamiento y la calidad de los alimentos suministrados a los animales.

Las investigaciones sobre la mitigación de aflatoxinas en la alimentación animal han permitido identificar diferentes estrategias de control, entre las que se encuentran los métodos físicos, químicos y biológicos. Dentro de estas alternativas, los adsorbentes minerales, como las bentonitas, han sido estudiados por su capacidad para unirse a la aflatoxina B1 (AFB1) en el tracto gastrointestinal, disminuyendo su biodisponibilidad y, potencialmente, su transferencia metabólica a aflatoxina M1 (AFM1) en la leche. En este sentido, (Allen et al., 2019) investigaron la administración de un adsorbente de arcilla en vacas Holstein y su efecto sobre la reducción de AFM1 en la leche. Por otra parte, las estrategias biológicas basadas en

microorganismos y enzimas han despertado interés por su potencial para transformar o degradar determinadas micotoxinas, aunque su eficacia depende del mecanismo de acción y de las condiciones de aplicación.

En Colombia, la presencia de aflatoxinas en la cadena de producción láctea ha sido objeto de investigaciones orientadas a evaluar los riesgos asociados con la inocuidad de la leche. En este contexto, Tarazona-Manrique et al. (2020) desarrollaron una investigación en el departamento de Boyacá enfocada en la detección de aflatoxina M1 (AFM1) en muestras de leche cruda de vacas almacenadas en tanques de enfriamiento. Este estudio constituye un antecedente nacional relevante, dado que aborda la presencia de AFM1 en una etapa de la cadena láctea y permite reconocer la importancia de implementar medidas preventivas frente a la exposición del ganado a alimentos contaminados con aflatoxina B1 (AFB1).

Los avances en biotecnología han impulsado el desarrollo de estrategias enzimáticas para la mitigación de aflatoxina B1 (AFB1) en alimentos destinados a la producción animal. En este contexto, Gao et al. (2024) evaluaron la capacidad de la enzima lacasa CotA, procedente de Bacillus subtilis ZJ-2019-1, para degradar AFB1 y zearalenona bajo condiciones experimentales controladas. Los resultados evidenciaron el potencial de esta enzima para la degradación de ambas micotoxinas y mostraron una reducción de la citotoxicidad en las condiciones evaluadas. Estos hallazgos respaldan el interés de las tecnologías enzimáticas como alternativas de mitigación, aunque su aplicación práctica en piensos para ganado lechero requiere estudios adicionales de eficacia y seguridad.

Diversas investigaciones han estudiado métodos físicos y biológicos para reducir la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) en los alimentos destinados al ganado. Entre los métodos físicos se encuentran los tratamientos térmicos y la irradiación, cuya efectividad depende de las condiciones de aplicación y de las características del alimento. Asimismo, se ha investigado el uso de materiales adsorbentes, como las arcillas, que pueden disminuir la absorción de AFB1 en el organismo del animal y contribuir a reducir su transferencia a la leche

como aflatoxina M1 (AFM1) (Allen et al., 2019). Por otra parte, las estrategias biológicas incluyen el uso de microorganismos y enzimas con capacidad para transformar determinadas micotoxinas. En este sentido, Gao et al. (2024) estudiaron la degradación enzimática de AFB1 mediante una lacasa de origen bacteriano. Aunque estas alternativas presentan resultados prometedores, su eficacia puede variar según las condiciones de aplicación, por lo que resulta necesario analizar sus ventajas, limitaciones y posibilidades de implementación en la alimentación de vacas lecheras.

Es clave examinar a fondo las técnicas dichas para bajar las aflatoxinas en la alimentación de las vacas lecheras, pues así se asegura su uso o almacenamiento en granjas. Al pensar en usar estos métodos, es clave fijarse en cosas como el precio, lo fácil que es usarlas y

si sirven por mucho tiempo con las condiciones ambientales específicas (Daniso et al., 2024), donde estudios nuevos, como los de Velarde Escobar et al. (2023), han dicho que, aunque muchas de estas ideas parecen buenas para reducir la aflatoxina B1, usar estas estrategias en todas las granjas lecheras es difícil, por lo mucho que cuestan y si los granjeros las aceptan. Según su estudio, hay niveles de aflatoxinas por muchos factores, como la comida que se les da y el clima, lo que dice que la aflatoxina M1 (AFM1) en la leche viene de alimentar a las vacas con pienso u otras comidas contaminado con AFB1.

En consecuencia, con la aparición de nuevas opciones y avances tecnológicos, resulta esencial que la indagación mencionada se ponga en práctica en los entornos particulares de las áreas de producción. En la Región del Cesar, donde se han documentado investigaciones sobre la presencia de Aspergillus spp. en piensos para ganado (Díaz Basto et al., 2024), la aplicación de estrategias de prevención y mitigación podría contribuir a mejorar la inocuidad de los alimentos destinados a las vacas lecheras.

1.4. Marco teórico

Cuando se habla de aflatoxina B1, es clave mencionar tres puntos clave: su origen y cómo vive el hongo que la produce, cómo nos afecta y qué podemos hacer para evitarlo. La AFB1 la generan sobre todo hongos del tipo *A. flavus* y *A. parasiticus* que crecen bien si hay humedad alta y calor (Lavkor et al., 2019). Esta toxina es muy peligrosa y puede causar cáncer, siendo un riesgo directo para la salud de personas y animales.

En el consumo animal, la aflatoxina B1 (AFB1) se representa como un grave percance que amenaza su salud y la salubridad de lo que ingerimos. Las micotoxinas, o aflatoxinas más específicamente, son substancias nocivas que surgen de mohos, mayormente de clanes cuales *Aspergillus spp*., de ahí *Aspergillus flavus* y *Aspergillus parasiticus*. Su aparición en la comida de los animales está muy ligada.

Una causa primaria del pienso contaminado con AFB1 es el manejo ineficiente de la cosecha y el almacenaje impropio de los granos. A veces la contaminación comienza en el campo, si el ambiente favorece el crecimiento de hongos, tal como cuando el calor es intenso y la humedad excesiva. Estudios revelan que el almacenamiento prolongado de granos en sitios cálidos y húmedos potencia el desarrollo de estos hongos, elevando así la concentración de aflatoxinas en los alimentos para animales (Okpara et al., 2021). Además, si hay granos rotos o con moho en la mezcla del pienso, la cantidad de AFB1 puede ser mucho mayor, poniendo en riesgo la salud de animales y personas (Enespa y Chandra, 2022).

La contaminación aflatoxinas fuertemente influenciada por cómo se recolectan y guardan los alimentos para el ganado vacuno esta. ¿Cuándo la recolección se hace antes de tiempo? ¿Si los granos se manipulan con rudeza? ¿O si se guardan en lugares inadecuados

como espacios húmedos y sin aire? todo esto crea un ambiente muy ideal para que crezca el hongo *Aspergillus flavus* (Mendes et al., 2023). En una investigación se halló bastante AFB1 en comida para personas y animales. Esto da a entender que la ausencia de buenos controles en estos pasos ayuda la contaminación (Blanco-Lizarazo et al., 2019). También usar granos rotos o con moho para hacer comida para animales hace más probable la transmisión de aflatoxinas

Aspergillus flavus es un hongo filamentoso toxigénico capaz de producir aflatoxinas, y su desarrollo está determinado por la temperatura, la humedad relativa ambiental y la actividad de agua (a_w) del sustrato colonizado. Con respecto al crecimiento fúngico, la temperatura óptima se sitúa entre 27 y 37 °C, mientras que la humedad relativa ambiental favorable oscila entre 70 y 90 % (Mendes et al., 2023). Sin embargo, la variable que gobierna directamente la colonización del grano es la actividad de agua del sustrato, que representa el agua disponible para el metabolismo microbiano; en términos generales, el crecimiento de la especie se favorece con valores de a_w superiores a 0,80-0,85, y es más vigoroso por encima de 0,90. La humedad relativa del ambiente influye de manera indirecta, pues, al equilibrarse con el grano, modifica su a_w.

Por otra parte, las condiciones óptimas para la producción de aflatoxinas no coinciden necesariamente con las del crecimiento: la biosíntesis de estos metabolitos secundarios suele alcanzar su máximo en un intervalo de temperatura algo más estrecho (aproximadamente 25-30 °C) y con una a_w elevada (cercana a 0,95-0,99), y puede reducirse de forma marcada a temperaturas cercanas a los 37 °C, aun cuando el hongo continúe creciendo. Estas condiciones son frecuentes en regiones agrícolas de clima tropical y subtropical, donde cultivos como el maíz y la soya resultan susceptibles a la infección. Asimismo, la irrigación deficiente, que genera estrés hídrico en la planta, y las prácticas inadecuadas de manejo del cultivo y del almacenamiento intensifican estas circunstancias y favorecen la proliferación fúngica (González et al., 2021).

La deficiencia de prácticas de labranza eficaz es medular para la diseminación de

aflatoxinas. Técnicas como la rotación de plantíos, el empleo de cepas resistentes y la acción de control biológico contra hongos, tienen el potencial de disminuir el peligro de contaminación (Noronha et al., 2020). A pesar de esto, Numerosas fincas campestres dejan de lado estas estrategias, elevando la vulnerabilidad a la aparición de *Aspergillus flavus* y sus toxinas perjudiciales.

Los componentes del pienso influyen de forma significativa en la posibilidad de que exista una contaminación con AFB1. El maíz y el trigo, por ejemplo, culturas estas que son sumamente propensas a sufrir contaminaciones por hongos (González et al., 2021). Cuando ingredientes ya contaminados se agregan a las mezclas de pienso esto puede resultar en una concentración alta de AFB1. Así, los animales que ingieren tal alimento quedan en riesgo, y la

salud humana también, debido a la transmisión indirecta a través de productos como leche y carne (Basso et al., 2020).

1.4.1. Mecanismos de toxicidad.

La toxicidad de la aflatoxina B1 (AFB1) depende de su bioactivación hepática, y no de su conversión a aflatoxina M1 (AFM1). Tras su absorción, la AFB1 es oxidada por enzimas del citocromo P450 (principalmente CYP1A2 y CYP3A4) a AFB1-8,9-epóxido, un metabolito electrofílico altamente reactivo. Este epóxido se une covalentemente al ADN, formando aductos como AFB1-N7-guanina, y a proteínas, y es el principal responsable de la hepatotoxicidad y del potencial carcinogénico de la toxina (Wild y Gong, 2010). La AFB1 está clasificada por la IARC como carcinógeno del grupo 1. Paralelamente, otras rutas metabólicas contribuyen a su detoxificación o a su eliminación: la conjugación del epóxido con glutatión, mediada por glutatión S-transferasas, y la hidroxilación, que genera metabolitos de menor toxicidad como la AFM1.

La AFM1, aunque menos potente que su precursora, conserva cierta genotoxicidad y está clasificada en el grupo 2B de la IARC. En los rumiantes, el microbiota ruminal degrada parcialmente la AFB1, pero la fracción restante se absorbe y alcanza el hígado, donde una parte se transforma en AFM1 que se excreta en la leche. La AFB1 y sus metabolitos se eliminan además por la bilis y la orina. Debido a la presencia de AFM1 en los lácteos y al riesgo que supone la AFB1 en los piensos, numerosos países han establecido límites máximos para la AFB1 en alimentos para animales y para la AFM1 en leche y derivados, con el fin de proteger la salud animal y humana.

1.4.2. Efectos toxicológicos de la AFB1 en el ganado vacuno lechero y en el ser humano.

La exposición a la aflatoxina B1 (AFB1) genera efectos adversos tanto en el ganado bovino como en el ser humano, con manifestaciones que varían según la dosis y la duración de la exposición. En bovinos, la aflatoxicosis aguda, asociada a la ingestión de dosis elevadas en periodos cortos, se caracteriza por anorexia, disminución del consumo de alimento, ictericia, hemorragias y daño hepático severo, y puede ser mortal. La exposición crónica o subclínica a dosis bajas, más frecuente en condiciones de campo, se asocia con menor ganancia de peso, inmunosupresión, hepatotoxicidad y disminución de la producción de leche. Los terneros y los animales jóvenes suelen mostrar mayor sensibilidad que los adultos, y algunos autores describen prolapso rectal en cuadros crónicos, aunque este signo se reporta con menor frecuencia.

En humanos, los brotes de aflatoxicosis aguda, como el ocurrido en Kenia en 2004, produjeron insuficiencia hepática y una elevada mortalidad tras el consumo de maíz altamente contaminado. La exposición crónica se vincula con el carcinoma hepatocelular, cuyo riesgo aumenta de forma sinérgica en personas infectadas con el virus de la hepatitis B (Wild y Gong, 2020; IARC, 2012). En niños, estudios realizados en África Occidental han asociado la exposición a aflatoxinas con retraso del crecimiento (Gong et al., 2022), lo que ha llevado a considerarlos una población de mayor riesgo. Respecto a la gestación y la lactancia, se han detectado aflatoxinas en sangre de cordón umbilical y AFM1 en leche materna, y algunos estudios observacionales sugieren una asociación entre la exposición materna y menor peso al nacer (Turner et al., 2017); sin embargo, la evidencia disponible es limitada y asociativa, por lo que no permite establecer una relación causal definitiva.

1.4.3. Métodos y estrategias para la mitigación de AFB1

Las estrategias y métodos para mitigar la AFB1 en la alimentación animal incluyen métodos físicos, químicos y biológicos. En los métodos físicos algunos métodos suelen ser muy poco prácticas o efectivas; sin embargo, entre estas se destacan la intervención en condiciones de almacenamiento, como el control de temperatura y humedad, así como el uso de tecnologías de secado e irradiación con microondas (Mostafa y Yousif, 2025).

Por lo tanto, el eslabón de transformación láctea done la gestión de la Aflatoxina M1 inicia con protocolos de vigilancia y control de calidad en la recepción de materia prima. Dado que la AFM1 es termoestable y no se elimina completamente mediante procesos convencionales como la pasteurización o la ultra-pasteurización, las plantas agroindustriales deben implementar sistemas de detección rápida, como ensayos ELISA o cromatografía de alta resolución, para monitorear los tanques de enfriamiento antes de su ingreso a la línea de proceso (Velarde Escobar et al., 2023; Pichardo-Matamoros y Elizondo-Salazar, 2020).

En contextos productivos de zonas tropicales, las altas temperaturas y la humedad favorecen el crecimiento de Aspergillus flavus y la producción de AFB1 en los cereales y subproductos destinados a la alimentación animal, sobre todo cuando las condiciones de almacenamiento son deficientes (ventilación insuficiente, humedad elevada del grano o presencia de plagas que dañan el sustrato). Por esta razón, el riesgo de contaminación del pienso aumenta antes de que este llegue al animal, y el monitoreo riguroso de las materias primas en los centros de acopio constituye una de las primeras barreras de control para garantizar la inocuidad de la leche y sus derivados (Sharafi et al., 2024; Tarazona-Manrique et al., 2020). Este control resulta especialmente relevante porque el estrés calórico suele reducir el consumo de materia seca en las vacas lecheras, de modo que la exposición a la toxina no depende de un mayor consumo de alimento, sino de la concentración de AFB1 que ya contiene la ración.

Cuando se identifican lotes de leche con concentraciones de AFM1 superiores a los límites legales, la industria agroindustrial aplica diversas estrategias técnicas:

Segregación y Disposición Segura: En cumplimiento con las Buenas Prácticas de Manufactura, los lotes altamente contaminados son rechazados y segregados para evitar la contaminación cruzada en silos de almacenamiento general. Dependiendo de la severidad y la normativa local, esta leche puede ser destinada a usos no alimentarios o eliminada bajo protocolos ambientales para prevenir su reingreso a la cadena trófica (Noronha et al., 2020).

Absorción reversible y Descontaminación Biológica: Una innovación más en la ingeniería de bioprocesos es la aplicación de bacterias acido-lácticas. Ciertas cepas de Lactobacillus, estas demuestran habilidad técnica, la capacidad de adsorber y secuestrar moléculas de AFM1. Su pared celular, durante el proceso de fermentación, esto va a ayudar a reducir la biodisponibilidad de la toxina, especialmente en productos derivados como el yogur, o en quesos frescos (Basso et al., 2020).

Tratamientos tecnológicos emergentes: Se están investigando alternativas como el plasma frío y los adsorbentes a base de arcillas modificadas (bentonitas) para reducir los riesgos asociados con la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1). Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías requiere considerar su eficacia, seguridad y cumplimiento de la normativa vigente. En particular, el plasma frío debe entenderse como una tecnología experimental con potencial para reducir la contaminación por micotoxinas, cuya implementación en piensos destinados al ganado lechero requiere estudios adicionales de validación y evaluación regulatoria (Allen et al., 2019; González et al., 2021; Mahmoud et al., 2025).

Sistemas de gestión de inocuidad: La industria láctea puede incorporar estos conocimientos en sus planes de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control (HACCP), con el propósito de prevenir y controlar los riesgos asociados con la presencia de aflatoxina M1 (AFM1) en la leche. Para ello, es necesario identificar los peligros en cada etapa del proceso y establecer medidas de control según los resultados del análisis de riesgos. En la recepción de

leche, pueden implementarse procedimientos de verificación y monitoreo para evaluar el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa vigente, sin que esta etapa se considere automáticamente un punto crítico de control (Sharafi et al., 2024).

Por ese motivo muchísimas industrias de lácteos ponen en marcha cursos de adiestramiento destinados a los productores, enfocados a robustecer las prácticas correctas de cultivo y manejo del sustento para los animales, como por ejemplo la debida guarda de los cereales, el dominio de la humedad y la vigilancia del estado de los elementos que se emplean en el sustento del ganado. Estas medidas consiguen aminorar la existencia de aflatoxina B1 en la ración, rebajando por lo tanto el peligro de brote de aflatoxina M1 en la leche.

El uso de estas estrategias no solo contribuye a mejorar la calidad e inocuidad de los alimentos destinados al ganado, sino que también permite disminuir el riesgo de exposición de los animales a la aflatoxina B1 (AFB1). Esta micotoxina, una vez ingerida y absorbida por el organismo, puede ser metabolizada en el hígado y transformarse en aflatoxina M1 (AFM1), la cual posteriormente puede excretarse a través de la leche, representando un riesgo para la inocuidad de los productos lácteos (Blanco et al., 2019).

2 DISEÑO METODOLÓGICO

El proyecto se centró en una exhaustiva revisión de la literatura que examino diversas técnicas y enfoques para reducir las aflatoxinas B1 en piensos. Se busco identificar, describir, y categorizar las metodologías existentes, ya fueran químicas, biológicas o físicas, empleadas para controlar y mitigar AFB1 en los piensos. Este proceso se realizó considerando el panorama actual y las circunstancias agropecuarias regionales.

2.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolló mediante un estudio documental de tipo descriptivo-analítico, basado en una revisión sistemática de literatura científica sobre los métodos y estrategias utilizados para mitigar la aflatoxina B1 (AFB1) en la alimentación del ganado lechero, así como sus posibles repercusiones en la inocuidad de los productos lácteos. Para el desarrollo de la revisión se siguieron los lineamientos de PRISMA 2020 (Page et al., 2021), mediante un proceso organizado de búsqueda, selección y análisis de artículos científicos publicados entre 2015 y 2026. Este procedimiento incluyó la identificación de estudios en bases de datos científicas, la eliminación de registros duplicados y la aplicación de criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. El análisis se centró en describir y comparar los métodos de mitigación reportados, considerando sus mecanismos de acción, eficacia y condiciones de aplicación. Asimismo, la información recopilada se organizó en una matriz de Excel, lo que permitió identificar la frecuencia de los métodos estudiados y sintetizar los principales hallazgos de las investigaciones seleccionadas.

2.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

Desde la perspectiva de la ingeniería agroindustrial, la población de esta investigación estuvo constituida por documentos científicos relacionados con la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) en la alimentación del ganado lechero, así como con los métodos y estrategias

utilizados para su prevención, control y mitigación. Se consideraron investigaciones publicadas entre 2015 y 2026, enfocadas en la contaminación de materias primas y piensos, las condiciones de almacenamiento y los métodos de mitigación aplicados en la cadena de producción láctea.

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science, utilizando la ecuación de búsqueda: “aflatoxin B1” AND animal AND “animal feed” AND milk AND contamination AND control. Se tuvieron en cuenta los criterios de inclusión y exclusión definidos para la revisión sistemática, considerando el período de publicación, el idioma, el tipo de documento y la pertinencia de los estudios respecto a los objetivos de la investigación. Asimismo, se prestó especial atención a investigaciones desarrolladas en sistemas de producción agropecuaria con condiciones climáticas similares a las de la región del Cesar (Tarazona-Manrique et al., 2020).

La muestra estuvo conformada por 36 artículos científicos seleccionados mediante el proceso de identificación, cribado y evaluación de elegibilidad, siguiendo los lineamientos de PRISMA 2020 (Page et al., 2021). La selección se realizó a partir de criterios previamente establecidos, con el propósito de incluir investigaciones que aportaran información relevante sobre las causas de contaminación por AFB1, los métodos de mitigación y las estrategias de detección y monitoreo (Toso

et al., 2018). Por tratarse de una revisión sistemática, la selección de los artículos respondió a su pertinencia y cumplimiento de los criterios de elegibilidad, y no a procedimientos de muestreo estadístico.

Posteriormente, tras aplicar los criterios de inclusión se priorizaron estudios que evaluaron los siguientes aspectos:

Eficiencia de procesos: Métodos físicos (irradiación, secado), químicos (adsorbentes como bentonitas) y biológicos (enzimas y probióticos) para la degradación de AFB1 (González et al., 2020; Mahmoud et al., 2025).

Variables operacionales: Influencia de la humedad relativa y la temperatura durante el almacenamiento de materias primas en regiones cálidas (Mendes et al., 2023).

Impacto en el producto final: Relación entre la ingesta de AFB1 presentes en el pienso y la excreción de AFM1 en la leche almacenada en tanques de enfriamiento, de acuerdo con los estándares de inocuidad aplicables al departamento del Cesar, Colombia (Tarazona-Manrique et al., 2020).

En cuanto a los criterios de exclusión se descartaron las publicaciones que se encontraban fuera del periodo comprendido entre 2015-2026, los artículos que no estuvieron directamente relacionados con la mitigación de AFB1 y los estudios no experimentales o de revisión que no aportan datos rigurosos.

2.3. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para recolectar la información sobre los métodos de mitigación de la aflatoxina B1 en vacas lecheras, se utilizó un plan de búsqueda enfocado en artículos científicos que abordaron la problemática de las aflatoxinas y las diferentes técnicas empleadas para su mitigación. Las bases de datos que se emplearon para la búsqueda y recopilación de información fueron Scopus y Web of Science. Esta estrategia permitió organizar y

analizar de manera sistemática los hallazgos, facilitando la identificación de patrones recurrentes y de los enfoques predominantes utilizados para la mitigación de AFB1 en los piensos destinados a la alimentación bovina.

Adicionalmente, se establecieron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los artículos científicos de acuerdo con su pertinencia frente a los objetivos de la investigación. Estos criterios permitieron organizar el proceso de selección de los estudios y mantener una relación clara entre los artículos incluidos y los objetivos de la investigación.

2.4. ANÁLISIS Y TABULACIÓN DE DATOS

Los artículos seleccionados para la investigación fueron organizados en una tabla de análisis elaborada en Excel. En ella se registró información relevante como el autor, año de publicación, la fuente, el título de la investigación, metodología empleada, los hallazgos clave y los principales temas relacionados con la mitigación de la aflatoxina B1.

Esta organización permitió sistematizar la información y facilitar su comparación. Posteriormente, se realizó un análisis cualitativo, mediante el cual los estudios fueron agrupados según el tipo de tecnología evaluada (adsorbentes, biotecnología, tratamientos físicos, entre otros), valorándose su eficacia, aplicabilidad y pertinencia en contextos agroindustriales similares al del departamento del Cesar, Colombia. Asimismo, esta tabulación permitió identificar tendencias comunes, enfoques prometedores y vacíos de investigación que aún no habían sido abordados por la literatura científica.

2.5. HIPÓTESIS Y VARIABLES.

Esta investigación se orientó al análisis de los métodos y estrategias de mitigación de aflatoxina B1 (AFB1) reportados en la literatura científica, con el propósito de comparar su eficacia, mecanismos de acción y condiciones de aplicación en la alimentación del ganado lechero. Asimismo, se buscó identificar las alternativas que podrían contribuir a disminuir la exposición de los animales a esta micotoxina y, por consiguiente, reducir el riesgo de presencia de aflatoxina M1 (AFM1) en la leche, la cual se forma mediante la biotransformación hepática de la AFB1.

2.5.1. Categorías de analisis

Objetivo general: Analizar los métodos de mitigación disponibles para la reducción de aflatoxina B1 en la alimentación de vacas lecheras para la minimización de los niveles de aflatoxina M1 en la leche.

En el marco de este estudio, las categorías de análisis consideradas fueron las siguientes:

Estrategias y Operaciones de Mitigación Técnica.

Correspondió a los métodos aplicados para la detoxificación o secuestro de la micotoxina. Se categorizaron en:

- **Físicas:** incluyeron el control de variables higrométricas en silos y la aplicación de tratamientos térmicos o de irradiación (Mendes et al., 2023; Sharafi et al.,

2024).

- **Químicas:** comprendieron la adición de agentes adsorbentes de alta afinidad, como bentonitas y zeolitas, con el propósito de reducir la biodisponibilidad del contaminante (Allen et al., 2019; González et al., 2020).

- **Biológicas:** incluyeron el uso de sistemas enzimáticos y microorganismos (probióticos) para la biotransformación de la AFB1 (Basso et al., 2020; Mohanamba et al., 2024)

2.5.1.1. Categoría de análisis: Eficiencia en la reducción de concentraciones de AFB1 y AFM1. Correspondió al análisis de la eficacia reportada en los estudios científicos sobre los métodos utilizados para disminuir la presencia de aflatoxina B1 (AFB1) en los piensos y su posible transferencia a la leche en forma de aflatoxina M1 (AFM1). Para ello, se consideraron los resultados publicados sobre las concentraciones de estas micotoxinas antes y después de la aplicación de los tratamientos, cuando dicha información estuvo disponible (Velarde Escobar et al., 2023; Pichardo-Matamoros y Elizondo-Salazar, 2020).

2.5.1.2. Categoría de analisis.

Contexto geográfico y condiciones agropecuarias del departamento del Cesar. Correspondió al conjunto de características propias del contexto agropecuario del departamento del Cesar, incluyendo las prácticas agrícolas y las condiciones climáticas predominantes. Estos factores desempeñaron un papel importante en la eficacia de las estrategias y métodos de

mitigación analizados, por lo que fueron considerados como un elemento fundamental para la interpretación y el análisis de los resultados del estudio.

- **Objetivo específico 1:** Describir las principales causas de contaminación por aflatoxina B1 de los piensos destinados para la alimentación de vacas productoras de leche.

Categoria de analisis: Factores de contaminación. Correspondieron a las condiciones de almacenamiento, las condiciones climáticas y las prácticas agrícolas asociadas a la producción y conservación de los piensos.

Categoría de análisis: Presencia de aflatoxina B1 en los piensos. Se evaluó a partir de los niveles de contaminación reportados en los estudios analizados.

Categoría de analisis: Prácticas agrícolas locales, tipo de cultivo (maíz), humedad y temperatura ambiental. Estos factores fueron considerados para interpretar las condiciones que favorecieron la contaminación por AFB1.

- **Objetivo específico 2:** Identificar métodos químicos, biológicos y físicos utilizados para la mitigación de aflatoxina B1 en la alimentación animal.

Categoría de analisis: Tipo de método de mitigación. Correspondió a los métodos químicos, biológicos y físicos empleados para reducir la presencia de AFB1.

Categoría de analisis: Aplicación y caracterización de los métodos identificados. Se analizaron sus características, mecanismos de acción y eficacia reportada en la literatura científica.

Categoría de analisis: Tipo de alimento (pienso o forraje), especie de hongo predominante y accesibilidad técnica. Estos aspectos fueron considerados para valorar la aplicabilidad de las estrategias de mitigación.

- **Objetivo específico 3:** Analizar las estrategias analíticas y de monitoreo utilizadas para la detección y control de aflatoxina B1 y aflatoxina M1 en piensos y leche.

Categoría de análisis: Estrategias analíticas y de monitoreo. Correspondió a los métodos y técnicas utilizados para la detección y el control de la aflatoxina B1 (AFB1) en piensos y de la aflatoxina M1 (AFM1) en la leche, tales como ELISA, HPLC-FLD, HPLC-UV, LC-MS/MS e inmunoensayos rápidos.

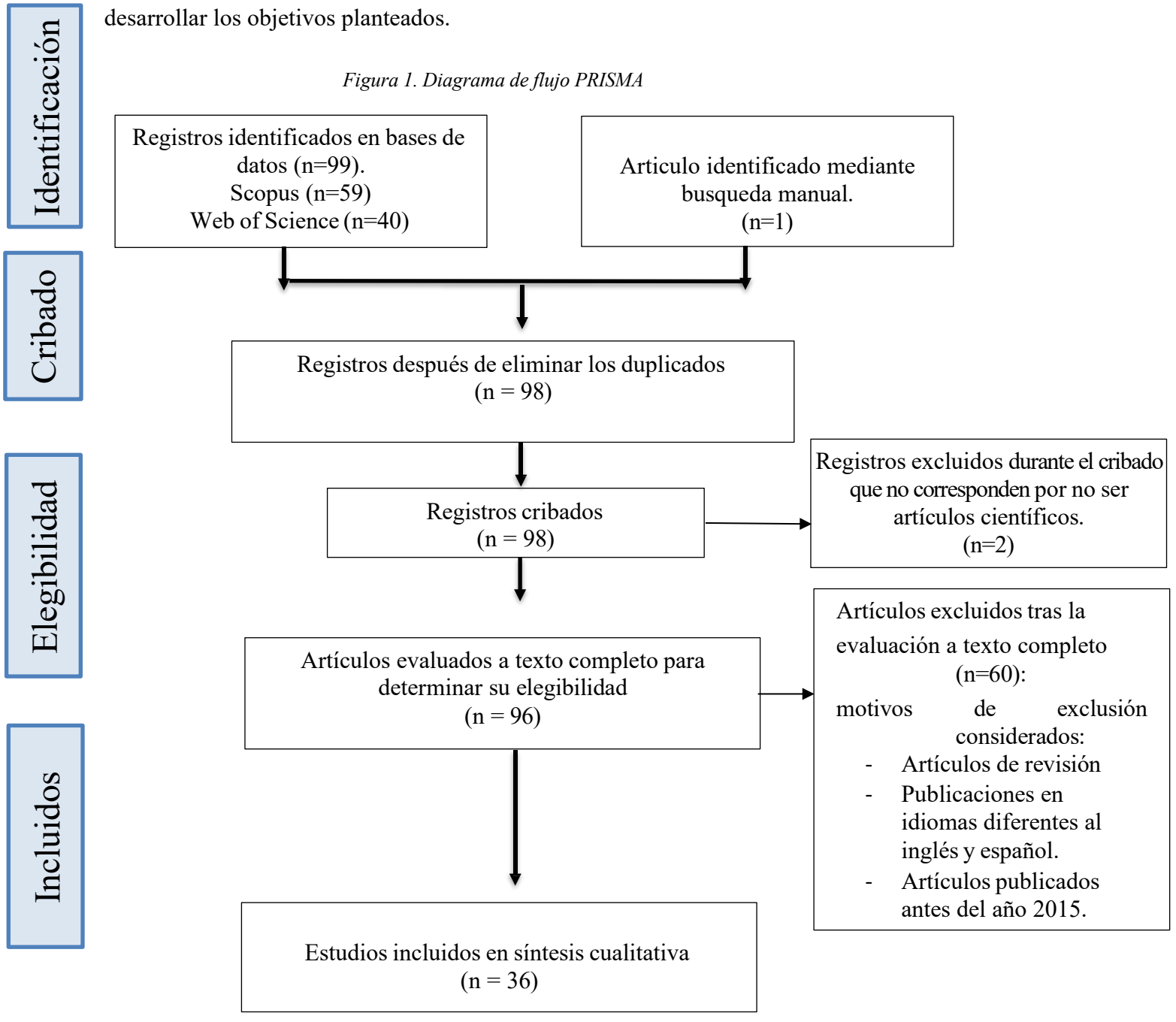
Categoría de análisis: Detección y cuantificación de AFB1 y AFM1. Se evaluó mediante la capacidad de las estrategias analíticas para identificar y cuantificar la presencia de AFB1 en los piensos y de AFM1 en la leche, considerando parámetros como sensibilidad, precisión, límite de detección y confiabilidad de los métodos.

Categoría de análisis: Condiciones de muestreo y análisis. Incluyó el tipo de muestra analizada (pienso o leche), las condiciones de almacenamiento y transporte de las muestras, el laboratorio o método de análisis empleado y la normativa de inocuidad alimentaria utilizada como referencia (por ejemplo, los límites máximos permitidos para AFB1 y AFM1).

3. DESARROLLO DEL TEMA

El trabajo se desarrolló mediante una revisión sistemática de literatura científica, siguiendo las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020 para presentar el proceso de identificación, selección e inclusión de los estudios (Page et al., 2021). Este procedimiento se explicó en el capítulo 2. Se buscaron estudios científicos publicados entre 2015 y 2026. Se consultaron las bases de datos Scopus y Web of Science. Después de aplicar los criterios de elegibilidad, se seleccionaron 36 artículos para el análisis. Estos artículos fueron utilizados para desarrollar los objetivos planteados.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA



Adicionalmente, se incorporó un artículo científico proporcionado por una docente de la universidad, el cual fue considerado durante el proceso de selección de los estudios.

3.1. Causas principales de contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) en piensos para vacas lecheras

La presencia de aflatoxina B1 en los piensos suele estar relacionada con el crecimiento de mohos del género *Aspergillus sp*., como *A. flavus* y *A. parasiticus*. Estos aparecen cuando hay mucha humedad, calor y un almacenamiento no muy adecuado del alimento. En esas condiciones, los hongos pueden producir la micotoxina AFB1 tanto en forrajes ensilados como en otros tipos de piensos, sobre todo durante las primeras etapas donde hay oxígeno, que pueden durar hasta unas 72 horas. Esto termina afectando la calidad del alimento que consumen las vacas lecheras. Aunque, hay que decirlo, no siempre que está el hongo significa que se vaya a formar la toxina (Gonda et al., 2024, p. 2).

La calidad del pienso depende bastante de cómo se formula, cómo se procesa y también de cómo se guarda. En muchas zonas, los ganaderos usan mezclas hechas de forma artesanal o semiindustrial, combinando subproductos locales con granos básicos. El problema es que estos piensos a veces conservan algo de humedad o se almacenan en lugares que no son los más adecuados, como bodegas abiertas o espacios donde les cae lluvia o entran plagas. Todo eso facilita que crezcan los hongos, y ahí empieza el inconveniente.

Por otro lado, cuando se usan granos quebrados o que ya están dañados, se incrementa la superficie expuesta, lo que hace más rápida la contaminación. En ese sentido, el pienso termina siendo como la vía principal por donde entra la aflatoxina B1 al organismo de las vacas. Por eso es importante tener en cuenta el tipo de alimento que se usa y cómo se manipula, aunque a veces esto no se controla tanto como debería.

Tabla 1. Clasificación y características de los principales tipos de piensos utilizados en la alimentación de vacas lecheras.

Tipo de Pienso	Descripción y Ejemplos	Uso Principal	Ventajas
Piensos Voluminosos	Ensilados de maíz, sorgo, gramíneas y heno	Base de la dieta (60-70%)	Alto contenido de fibra, bajo costo, estimula rumia
Piensos Concentrados	Maíz molido, torta de palma, torta de soya, pollinaza, melaza	Complemento energético y proteico	Alta densidad energética, mejora producción de leche
Piensos Mixtos o Balanceados	Mezcla de voluminosos, concentrados	Dieta total diaria	Balance nutricional óptimo
Piensos Suplementarios	Bloques minerales, núcleos vitamínicos, urea	Corrección de deficiencias	Fácil manejo, bajo volumen
Subproductos Agroindustriales	Torta de palma, bagazo de caña, afrecho, pollinaza	Reducción de costos	Económico, disponibilidad local

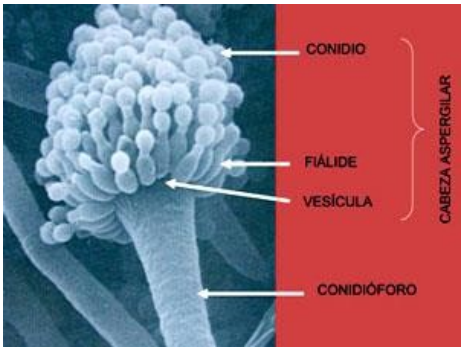
Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2019) y Escobar et al. (2023).

Los piensos voluminosos y los subproductos agroindustriales, ampliamente utilizados en la alimentación del ganado lechero, pueden presentar riesgo de contaminación por aflatoxinas, dependiendo del tipo de materia prima y de las condiciones de humedad, temperatura y almacenamiento. Gizachew et al. (2016) reportaron concentraciones de AFB1 entre 290 y 397 µg/kg en torta de noug, mientras que Patyal et al. (2021) encontraron presencia de AFB1 en el 59 % de las muestras de alimentos concentrados evaluadas. Asimismo, Díaz Basto et al. (2024) estudiaron la presencia de hongos del género Aspergillus en piensos para ganado durante la época de sequía en Aguachica, Colombia. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar medidas preventivas para disminuir el riesgo de contaminación por AFB1 en la cadena de producción láctea.

3.1.1. *Aspergillus spp.*

Los hongos del género Aspergillus se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza y pueden desarrollarse en diferentes tipos de materiales. Algunas especies de este género pueden contaminar los piensos destinados a la alimentación animal. En este sentido, Díaz Basto et al. (2024) evaluaron la presencia de Aspergillus spp. en piensos para ganado durante la época de sequía en Aguachica, Cesar, Colombia, lo que evidencia la importancia de estudiar estos hongos en los sistemas de alimentación ganadera.

Figura 2. Estructuras de reproducción asexual de Aspergillus *spp.*



Fuente: Méndez, 2015

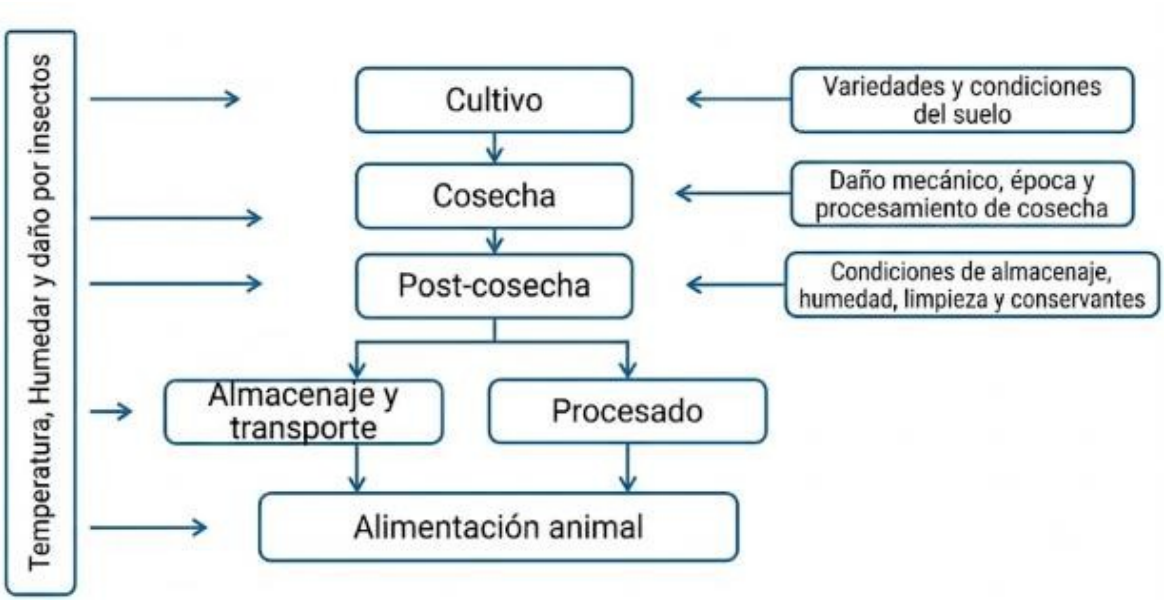
Los hongos del género Aspergillus pueden afectar la salud humana y animal mediante diferentes mecanismos, entre ellos las reacciones de hipersensibilidad ocasionadas por la exposición a sus esporas. Sin embargo, en el contexto de la alimentación del ganado lechero, el principal interés se centra en la capacidad de

determinadas especies, como A. flavus y A. parasiticus, para producir aflatoxinas que pueden contaminar los piensos y representar un riesgo para la inocuidad de la cadena láctea.

En otras situaciones, la reacción no es inmediata. En su lugar, se desarrolla con el tiempo debido a la exposición constante a altas concentraciones de esporas. Esto es común en personas que trabajan en silos o bodegas donde los granos se almacenan en condiciones de humedad y temperatura no siempre adecuadas. En estos casos, se observa un aumento en los niveles de IgG. Aunque a veces se pasa por alto, esto también puede ser relevante. Intoxicación por micotoxinas (micotoxicosis): Se produce por la ingestión de metabolitos tóxicos generados por el hongo. Especies como *A. flavus*, *A. parasiticus* y *A. nomius* producen aflatoxinas durante su crecimiento en alimentos, las cuales pueden causar graves daños orgánicos incluso cuando el hongo ya no está presente. Estas toxinas, junto con otras como las ocratoxinas y la gliotoxina, han demostrado efectos hepatotóxicos, carcinogénicos e inmunosupresores (Alvarenga et al., 2012).

Invasión tisular (micosis): El término “aspergilosis” se refiere a la invasión de tejidos y órganos por parte de estos hongos. *Aspergillus*. posee la capacidad de invadir gracias a la producción de enzimas como lipasas, proteasas, elastasas y DNasas.

Figura 3. Factores que afectan el crecimiento fúngico y la producción de micotoxinas.



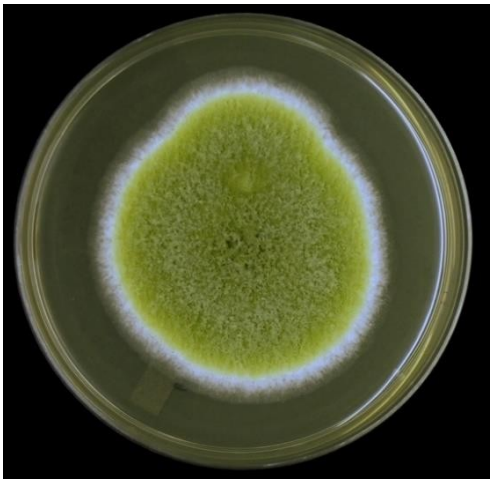
Fuente: Denli *et al.*, 2006.

3.1.2. *Aspergillus flavus, Aspergillus parasiticus y Aspergillus nomius.*

Entre las especies del género Aspergillus que tienen mayor importancia por su capacidad de producir aflatoxinas se encuentran A. *flavus, A. parasiticus* y *A. nomius*. Estas especies pueden contaminar diferentes materias primas destinadas a la alimentación animal. La aflatoxina B1 (AFB1) es una de las aflatoxinas de mayor relevancia toxicológica debido a su potencial carcinogénico (Frisvad et al., 2019), por lo que su presencia en los piensos representa un riesgo para la inocuidad de la cadena láctea.

Aspergillus flavus es una especie ampliamente distribuida en la naturaleza que puede desarrollarse en diferentes materias primas agrícolas. Algunas de sus cepas tienen capacidad para producir aflatoxinas del grupo B, principalmente AFB1 y AFB2. Por su parte, A. parasiticus puede producir aflatoxinas de los grupos B y G, mientras que A. nomius también presenta capacidad de producir aflatoxinas de ambos grupos (Álvarez-Días et al., 2022).

Figura 4. Aspergillus flavus.



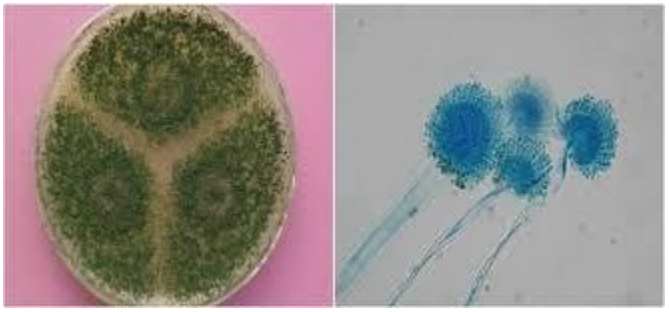
Fuente: Yuri, 2012.

Los parámetros para el desarrollo de *Aspergillus flavus* están relacionados con la temperatura, la actividad de agua (aw) y el pH. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2001), este hongo puede crecer en un intervalo de temperatura de 10 a 43 °C, con una temperatura óptima ligeramente superior a 30 °C. Por su parte, la producción de aflatoxinas puede presentarse entre 15 y 37 °C, siendo más favorable entre 20 y 30 °C. En cuanto a la actividad de agua, el valor óptimo para el crecimiento es aproximadamente 0,99, con un máximo reportado de al menos 0,998.

Aspergillus parasiticus tiene la capacidad de producir aflatoxinas de los grupos B y G, específicamente AFB1, AFB2, AFG1 y AFG2, que pueden contaminar materias primas destinadas a la alimentación animal. Su crecimiento y la producción de aflatoxinas están influenciados por factores como la temperatura, la actividad de agua (aw) y el pH. Se han descrito temperaturas cercanas a 30 °C para favorecer su crecimiento y de aproximadamente 28 °C para la producción de aflatoxinas, así como una actividad de agua cercana a 0,87 como límite inferior para la producción de estas toxinas (FAO, 2001). Asimismo, el pH influye en el desarrollo del hongo; aunque se han señalado valores de 4,0 y 7,0, Sin embargo, su crecimiento y la producción de aflatoxinas pueden variar según las condiciones ambientales y el tipo de sustrato.

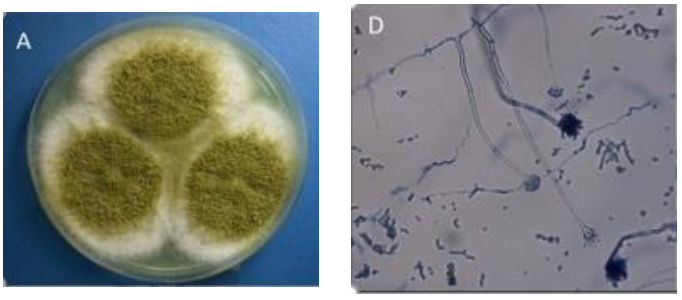
Por otro lado, el género *Aspergillus nomius* es una especie menos común pero altamente tóxica, morfológicamente similar a *A. flavus,* aunque se diferencia por la producción de esclerocios más pequeños y elongados, y por generar aflatoxinas tipo B y G (Frisvad et al., 2019). Aunque su distribución es más restringida, se ha reportado en regiones tropicales y subtropicales, contaminando nueces, maíz y subproductos oleaginosos.

Figura 5. Aspergillus parasiticus



Fuente: Abdulzahra *et al.,* 2021.

Figura 6. Aspergillus nomius.



Cultivo (A) y examen (D) microscópico en aislamiento clínico con SDA después de 5 días a 37°C.
Fuente: Emily W. T. Tom *et al.*, 2014.

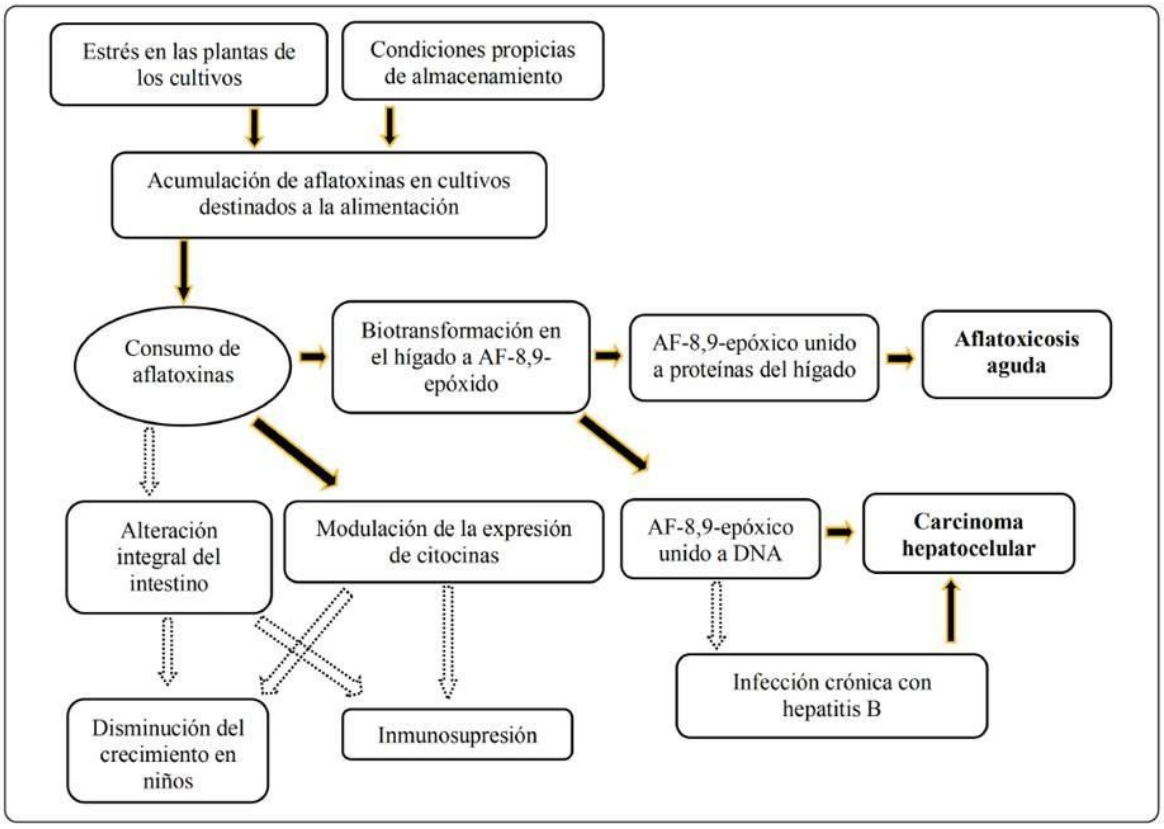
3.1.3. Biosíntesis de aflatoxina B1 por *Aspergillus* . y su relación con la agroindustria láctea

Determinadas especies y cepas aflatoxigénicas del género Aspergillus, especialmente A. flavus y A. parasiticus, tienen la capacidad de producir aflatoxina B1 (AFB1) mediante una ruta biosintética que involucra diferentes reacciones enzimáticas. Este proceso inicia con la formación de un precursor policétido mediante la acción de una policétido sintasa (PKS), que posteriormente da lugar a intermediarios como la norsolorina, la averufina y la versicolorina, hasta llegar a la formación de esterigmatocistina y, finalmente, AFB1. Esta ruta biosintética ocurre en el hongo y puede verse influenciada por factores ambientales como la temperatura, la humedad y la disponibilidad de nutrientes.

Esta vía metabólica de hacer cosas se activa más cuando se haya en un estrés ambiental. Por ejemplo, cuando hace mucho calor, cuando no hay mucho nitrógeno. O también cuando la actividad del agua (aw) está entre 0,90 y 0,99, estas condiciones son comunes en regiones tropicales (Álvarez-Días et al., 2022).

Aspergillus flavus y *A. parasiticus* son las especies más eficientes en esta biosíntesis. La producción de AFB1 ocurre principalmente durante la fase estacionaria del crecimiento fúngico, cuando el hongo ha colonizado el sustrato (granos, ensilados o subproductos agroindustriales) y enfrenta limitaciones nutricionales. Una vez producida, la AFB1 es altamente estable y persiste en los piensos incluso después de la muerte del hongo, representando un riesgo latente para la cadena alimentaria.

Figura 7. Proceso de la formación de metabolitos de aflatoxinas desde que la planta es infectada por el hongo, la biotransformación de la AFB1 al metabolito reactivo y las alteraciones agudas y graves que causan en los organismos.



Fuente: Umesha *et al.,* 2017.

Este cambio supone un considerable obstáculo para la agroindustria láctea. Cuando las vacas consumen alimentos contaminados con aflatoxina B1 (AFB1), esta es absorbida y posteriormente biotransformada en el hígado mediante enzimas del citocromo P450, dando lugar a la aflatoxina M1 (AFM1), que puede transferirse a la leche (Pichardo-Matamoros y Elizondo-Salazar, 2020). La tasa de transferencia, conocida como carry-over, se sitúa generalmente alrededor del 1 % al 2 % de la AFB1 ingerida, aunque puede alcanzar valores cercanos al 6 % en vacas de alta producción lechera. Esta proporción varía según la cantidad de AFB1 consumida, el nivel de producción de leche y las características individuales del animal (Zentai et al., 2023).

Por otro lado, la aflatoxina M1 (AFM1) es termoestable y no se elimina completamente mediante tratamientos térmicos habituales, como la pasteurización y el procesamiento a temperatura ultraalta (UHT) (Nguyen et al., 2020; Pichardo-Matamoros y Elizondo-Salazar, 2020). Por esta razón, la alimentación de las vacas lecheras con piensos contaminados con aflatoxina B1 (AFB1) representa un riesgo importante para la inocuidad de la leche y sus derivados. En este sentido, el control de la contaminación por AFB1 en los piensos constituye una medida fundamental de prevención dentro de la cadena de producción láctea, ya que permite reducir el riesgo de presencia de AFM1 en la leche y contribuir al cumplimiento de los requisitos de inocuidad exigidos en los mercados (Nguyen et al., 2020).

3.2. Métodos y estrategias de mitigación identificados

Para mantener la leche y la carne seguras para el consumo, es fundamental controlar la aflatoxina B1 en los alimentos para animales y así reducir la aflatoxina M1 en la leche. Esto implica desde cuidar mejor cómo se almacenan los alimentos, mejorar las prácticas en el campo, hasta estar atentos al clima que favorece el crecimiento de hongos (Ceniti et al., 2021, p. 5). Dada la alta termo estabilidad de la aflatoxina M1, los tratamientos térmicos habituales en la industria láctea como la pasteurización o la esterilización no logran degradarla por completo. Por esta razón, el contaminante logra atravesar la línea de procesamiento y permanece activo en la matriz del producto final. Por ende, es necesario un plan preventivo completo que controle su presencia desde el inicio de la cadena de producción de alimento para el ganado.

Es clave seguir reglas estrictas al cuidar los cultivos y usar aditivos que frenen los hongos en el ensilaje. Esto ayuda a que no proliferen los hongos *Aspergillus spp*. y, por lo tanto, a que se produzca menos AFB1 (Diogenes et al., 2023, p. 23). También es importante detectar la AFB1 en los piensos a tiempo. Así, se pueden separar o tratar los lotes contaminados antes de

dárselos a los animales, reduciendo su paso a la leche. Además, usar métodos de análisis modernos para medir con precisión la AFM1 en productos lácteos es vital para cumplir las normas y proteger la salud de la gente.

Se agruparon en tres tipos principales (ver Tabla 2): métodos físicos, químicos y biológicos (Ferrari et al., 2022, p. 770).

Los métodos físicos incluyen controlar la humedad y la temperatura al guardar los alimentos. Además, debe asegurarse de que el grano esté en buen estado para evitar que se contamine. Las estrategias químicas usan tratamientos como ácidos orgánicos o amoníaco, mientras que las biológicas se basan en usar organismos vivos o enzimas para descomponer las micotoxinas. Especialmente los métodos biológicos resaltan, son seguros y no dañan el medio ambiente, a diferencia de las soluciones químicas y físicas, que a menudo tienen problemas o perjudican el entorno.

Tabla 2. Métodos y estrategias para la mitigación de aflatoxina B1 (AFB1) identificados en la revisión documental.

Métodos Y Categoria	Eficacia O Resultado Reportado	Condiciones De Aplicacion	Limitaciones	Referencia
Plasma no térmico (físico)	Reducción de AFB1 de aproximadamente 80 % en maíz, bajo las condiciones experimentales estudiadas.	Tratamiento de granos de maíz; eficacia influenciada por voltaje, frecuencia, tiempo y cantidad de muestra.	Requiere equipos especializados y validación a escala industrial.	Zhao et al. (2024)
Ozonización (químico)	Se estudió la degradación de aflatoxinas mediante ozono; porcentaje específico pendiente de corroborar.	Ensayos con concentraciones de ozono de 8,5 a 40 ppm en soluciones acuosas.	Los resultados en solución no se pueden extrapolar directamente a piensos sólidos.	Agriopoulou et al. (2016)
Adsorción con subproductos de maíz (físico-químico)	Se evaluó la capacidad de adsorción de AFB1; porcentaje	Uso de mazorca y salvado de maíz; variaciones de dosis, temperatura,	La adsorción experimental no demuestra por sí sola una reducción	Liu et al. (2024)

	específico pendiente de corroborar.	tiempo y pH.	de la exposición en vacas.	
Adsorbentes comerciales (químico/físico)	Se evaluó la capacidad de unión a micotoxinas, incluida AFB1, mediante ensayos in vitro.	Diez aditivos comerciales sometidos a condiciones gastrointestinales simuladas.	La eficacia in vitro no equivale necesariamente a eficacia en animales vivos.	Kolawole et al. (2019)
Bentonita y levadura hidrolizada (adsorbente y derivado biológico)	Se evaluaron sus efectos frente a la exposición a micotoxinas en animales; el resultado no debe presentarse como eficacia demostrada en vacas lecheras.	Evaluación experimental en cerdos.	Diferencias fisiológicas entre especies; requiere validación en ganado lechero.	Deng et al. (2023)
Adsorbentes en animales productores de leche	Se evaluó su efecto sobre la presencia de AFM1 en leche, como indicador de la transferencia de AFB1 ingerida.	Ensayo en búfalas lecheras.	Los resultados no pueden trasladarse automáticamente a vacas.	Aslam et al. (2016)

Los estudios analizados evidencian que existen diferentes estrategias físicas, químicas y biológicas con potencial para mitigar la contaminación por aflatoxina B1 en materias primas y piensos destinados a la alimentación animal. Sin embargo, su eficacia depende del tipo de alimento, las condiciones de aplicación y el sistema experimental utilizado. Para la región del Cesar, el control de la humedad y las condiciones de almacenamiento, junto con la evaluación de adsorbentes, constituyen alternativas de interés por su relación con la prevención de la contaminación en la cadena láctea. Por su parte, tecnologías como el plasma no térmico y la ozonización requieren evaluar su viabilidad técnica y económica antes de recomendar su implementación. Esta valoración corresponde a una propuesta de aplicabilidad regional basada en la evidencia revisada, y no a una validación experimental realizada en el Cesar.

Las estrategias físicas para reducir la contaminación por aflatoxina B1 (AFB1) constituyen una de las alternativas de prevención y mitigación en la alimentación vacuna. Entre estas se encuentran el control de la humedad y la temperatura durante el almacenamiento, la ventilación y el secado de las materias primas, medidas que permiten limitar las condiciones favorables para el crecimiento de hongos aflatoxigénicos. Asimismo, se han investigado tecnologías como el plasma no térmico, aplicado en granos de maíz para reducir la contaminación por AFB1, cuya eficacia depende de las condiciones experimentales, especialmente del voltaje, la frecuencia y el tiempo de exposición (Zhao et al., 2024).

Los resultados de eficacia, las condiciones de aplicación y las limitaciones de los métodos identificados se presentan de manera diferenciada en la Tabla 2. Es importante señalar que los resultados obtenidos en laboratorio no garantizan su aplicación directa en las fincas lecheras de la región del Cesar, debido a factores como los costos, la infraestructura disponible y las condiciones ambientales propias de los sistemas productivos de la región.

En cuanto a las estrategias químicas, el empleo de agentes adsorbentes inorgánicos destaca como una de las metodologías más utilizadas por su accesibilidad económica y viabilidad técnica en la ganadería lechera. Entre estos materiales se encuentran las arcillas aluminosilicadas, como las bentonitas sódicas y cálcicas, la clinoptilolita y otras zeolitas, que presentan capacidad para unirse a la aflatoxina B1 (AFB1) en el tracto gastrointestinal del animal (Allen et al., 2019; EFSA, 2021), disminuyendo su biodisponibilidad y absorción intestinal. De esta manera, pueden contribuir a reducir la transferencia de aflatoxina M1 (AFM1) hacia la leche, aunque su eficacia depende del tipo de adsorbente, la dosis utilizada y las condiciones de aplicación (Kolawole et al., 2019; Aslam et al., 2016).

Por otra parte, la degradación química directa mediante compuestos alcalinos, ácidos orgánicos y agentes oxidantes constituye otra alternativa de control químico evaluada en la literatura. Entre estos tratamientos se encuentran la amonización y la ozonización, que pueden favorecer la transformación de la aflatoxina B1 (AFB1) bajo determinadas condiciones de aplicación. Sin embargo, la disminución de la concentración de AFB1 no garantiza que los productos de degradación sean inocuos, por lo que es necesario evaluar su toxicidad, genotoxicidad y posibles residuos antes de considerar que el alimento ha sido detoxificado. Asimismo, la aplicación de estos procedimientos en materias primas destinadas a la alimentación animal requiere verificar sus efectos sobre la calidad nutricional y el cumplimiento de las disposiciones sanitarias correspondientes (Agriopoulou et al., 2016).

Las estrategias bioactivas centradas en microorganismos y componentes de sus paredes celulares se han estudiado como alternativas para mitigar la exposición a la aflatoxina B1 (AFB1). Entre los microorganismos investigados se encuentran bacterias ácido-lácticas, como Lactobacillus rhamnosus y Lactobacillus plantarum, especies del género Bacillus y levaduras como Saccharomyces cerevisiae. Algunos de estos microorganismos presentan capacidad para unirse a la AFB1 mediante componentes de su pared celular, mientras que otros pueden

participar en procesos de transformación enzimática de la toxina. Sin embargo, es importante diferenciar ambos mecanismos, ya que la adsorción no implica necesariamente la degradación de la AFB1 (Basso et al., 2020). Los estudios realizados en condiciones experimentales han reportado una disminución de la fracción libre de AFB1, cuya magnitud depende de la cepa utilizada y las condiciones del ensayo. Por tanto, estos resultados no deben interpretarse directamente como una reducción de la absorción de AFB1 en vacas lecheras ni de la presencia de AFM1 en la leche, sin evidencia experimental que lo demuestre. Asimismo, los posibles beneficios sobre la microbiota intestinal deben evaluarse de manera independiente (Sevim et al., 2024).

En el campo de la biotecnología, la biotransformación enzimática se ha investigado como una alternativa para la degradación de la aflatoxina B1 (AFB1). Se han estudiado enzimas como las lacasas, oxidasas, reductasas y peroxidasas, obtenidas de diferentes microorganismos, incluidos hongos como Aspergillus niger y Trichoderma reesei. Estas enzimas pueden modificar la estructura química de la AFB1 y generar productos de transformación, cuya toxicidad debe evaluarse antes de considerar que el tratamiento es seguro. Algunos estudios han reportado porcentajes elevados de degradación en condiciones experimentales específicas; sin embargo, estos resultados dependen de la enzima utilizada, las condiciones del ensayo y el tipo de matriz alimentaria. Por tanto, no pueden extrapolarse directamente a los piensos destinados a vacas lecheras sin estudios que demuestren su eficacia y seguridad (Daniso et al., 2024; Mengesha et al., 2023).

Aunque la aplicación comercial de enzimas purificadas aún enfrenta retos de estabilidad en el fluido ruminal y costos de producción, su alta especificidad y carácter ecológico las posicionan como la herramienta del futuro en inocuidad.

3.3. Métodos para analizar y mitigar la aflatoxina B1 en piensos.

Es importante detectar la aflatoxina B1 en los piensos destinados a la alimentación animal, debido a los riesgos que representa para la salud y la inocuidad de la cadena láctea. Para ello, se necesitan métodos eficaces y seguros que permitan identificar y cuantificar su presencia. Entre estos métodos se encuentran las pruebas rápidas de tamizaje, los métodos cuantitativos empleados en laboratorios especializados y las técnicas de análisis instrumental (Javiera et al., 2017). Sin embargo, debido a que la contaminación por aflatoxinas puede distribuirse de manera heterogénea en los piensos, es fundamental realizar un muestreo representativo mediante la recolección de varias submuestras de diferentes puntos del lote, seguido de su adecuada mezcla, trituración y homogeneización. Asimismo, es necesario aplicar controles de calidad analítica para garantizar la confiabilidad de los resultados, incluyendo la verificación de la precisión, recuperación y límites de detección y cuantificación del método utilizado.

3.3.1. Métodos cuantitativos de laboratorio

Las técnicas de cromatografía separan y estudian lo que hay en una mezcla. Funcionan por cómo una fase móvil y una fase estacionaria interactúan (Chromatographic Methods, s. f.). La fase móvil puede ser un líquido o un gas, esta fase transporta la muestra a través de la fase estacionaria onde la fase estacionaria es un sólido o puede ser un líquido fijado a una superficie.

En el proceso, la muestra se disuelve en la fase móvil para luego colocarles en la fase estacionaria y cada parte de la mezcla interactúa distinto con las dos fases. Por eso, unos compuestos se mueven más rápido. Esta diferencia de velocidad ayuda a separar y saber qué hay en la muestra.

Algunas de las cromatografías más comunes para analizar aflatoxinas son TLC (cromatografía de capa fina), HPLC (cromatografía líquida de alta resolución), GC (cromatografía de gases) y LC-MS. Estas técnicas son muy sensibles y precisas, permitiendo

ver cantidades muy pequeñas de aflatoxinas. Sin embargo, usarlas necesita equipos especiales, gente capacitada y formas de preparar las muestras, esto puede ser complejo y caro

figura 8. Comparación de distintos métodos utilizados para la detección y análisis de aflatoxinas en alimentos y piensos.

Método	Preparación de la muestra	LOD	Aplicable en campo
AgraStrip®	Extracción simple con metanol	4 ppb	Adecuado
Tira reactiva inmunológica	Solo extracción	5 µg/kg	Adecuado
CHARM EZ-M	Extracción a base de agua	1 ppb	Inadecuado
Fluorómetro	IAC	5–5000 µg/kg	Inadecuado
Densitómetro para cromatografía de capa fina	Extracción líquida, SPE	1–20 ng/kg	Inadecuado
HPTLC	Extracción líquida	Pictograma	Inadecuado
RIA	Extracción líquida	1 µg/kg	Inadecuado
FTIR	Extracción líquida	<10 µg/Kg	Inadecuado
ELISA	Extracción líquida	1 µg/kg	Inadecuado
HPLC	IAC o SPE	0,5 µg/kg	Inadecuado
LC-MS	Extracción líquida	0,1 µg/kg	Inadecuado
QCM	Extracción líquida	0,01–10 ng/mL	Inadecuado
SPRS	Extracción líquida	3,0–98 ng/mL	Inadecuado
Electroquímica	Extracción líquida	0,1–2 µg/kg	Inadecuado

Fuente: Abbas, 2021.

3.3.2. Cromatografía de Capa Fina (TLC)

La cromatografía de capa fina, o TLC, fundamental, es una de las técnicas base clave para la detección, aislamiento y examen de aflatoxinas en alimentos y forrajes. Un método que fue considerado el método oficial por la Asociación de Químicos Analíticos Oficiales (AOAC) allá en 1990, empleando una fina capa de material adsorbente como gel de sílice, alúmina o celulosa, y esto se fija sobre un sustrato de vidrio, aluminio o plástico (Miklós et al., 2020). Una fase móvil, constituida por combinaciones de disolventes polares u orgánicos como el acetonitrilo, metanol y agua, o también cloroformo con acetona, provoca que la muestra se mueva de forma distinta sobre la capa sólida, así se consiguen separar las sustancias de interés (AOAC International, 2019).

El principio que impulsa la cromatografía en capa fina (TLC), esto es, su método de operación se basa en la forma en que las aflatoxinas se distribuyen y se adhieren de forma diferente entre la capa fija (estacionaria) y el fluido que las arrastra (móvil). Dicha distribución y adhesión dependen de las diferencias en su polaridad y en sus afinidades químicas. Esta interacción dinámica genera que las diferentes formas del metabolito conocido como aflatoxina (es decir, AFB1, AFB2, AFG1, y AFG2), se muevan a ritmos distintos sobre la placa cromatográfica. De esto se sigue que su separación sea posible, y que se consiga una identificación semi-cuantitativa de un modo veloz y eficaz. Tomando en cuenta su capacidad para resolver bien y su alta sensibilidad, la TLC y su versión mejorada la TLC de alta eficacia (HPTLC) son técnicas que aún se usan mucho en la industria de los alimentos. Estas se emplean para detectar rutinariamente micotoxinas, lo que tienen límites de detección bajos de 1 a 20 ppb (μg/kg) (Pleadin et al., 2019).

Una de sus mejores ventajas es que puede encontrar varios tipos de micotoxinas. Pero la técnica tiene desventajas, debido a que se necesitan pasos para preparar las muestras. También se necesita personal preparada y equipo especial, además pueden ocurrir errores en la aplicación de la muestra, al desarrollar la placa o al entender los resultados.

Para mejorar la exactitud analítica y conseguir una cuantificación precisa, la propia fluorescencia de las aflatoxinas se puede determinar por medio de fluorodensitometría. Esta técnica instrumental trasciende las deficiencias de la valoración visual, permitiendo alcanzar límites de detección tan mínimos como 1 µg/kg (Miklós et al., 2020). Aun así, el precio tan alto de compra y la conservación especifica requerida para los aparatos fluorodensitometricos han limitado su uso habitual en muchos laboratorios (Alshannaq y Yu, 2017). En respuesta a estas trabas como progreso tecnológico, surgió la cromatografía en capa fina de alta prestación (HPTLC), una variante automatizada que perfecciona la introducción de la muestra, la corrida del cromatograma y la interpretación de datos, asegurando mayor consistencia, separación y confiabilidad en los estudios de micotoxinas.

3.3.3. Cromatografía de Capa Fina de Alto Rendimiento (HPTLC)

La cromatografía en capa fina de alto rendimiento (HPTLC) encarna una mejora significante sobre la TLC de siempre, merced a la total automatización de etapas esenciales como es la aplicación de las muestras, la corrida de la placa, y también la captación y la interpretación de los datos. Hoy por hoy, la HPTLC se considera una opción sumamente eficiente y segura para la búsqueda de aflatoxinas, sobresaliendo por su mayor sensibilidad, exactitud, y claridad analítica. El uso de aplicadores automatizados precisos, lectores densitometricos, y programas de computador específicos minimiza considerablemente la posibilidad de error humano, ofreciendo así una gran consistencia y mayor certeza en las conclusiones alcanzadas (Miklós et al., 2020)

Una ventaja de la HPTLC es que necesita muy poca muestra, con solo 1 µl en comparación con la TLC. Por esto, puede encontrar aflatoxinas en cantidades muy bajas, alcanzando a ver hasta casi 5 pg. Pero, esta técnica tiene limitaciones como necesitar máquinas caras, preparación de las muestras de forma compleja y requiere gente muy capacita. Por eso, se

usa más en laboratorios especiales siendo difícil usarla para pruebas fuera del laboratorio. (Abbas, 2021)

3.3.4. Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC)

La cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) es una técnica utilizada para separar, identificar y cuantificar compuestos, incluidas las aflatoxinas. Este método permite obtener resultados precisos mediante el paso de una muestra líquida por una columna que contiene una fase estacionaria, mientras una fase móvil líquida transporta los componentes de la muestra. La separación ocurre debido a las diferentes interacciones de los compuestos con ambas fases, lo que permite su posterior detección y cuantificación. En el análisis de aflatoxinas, la HPLC puede emplearse con detectores de fluorescencia (HPLC-FLD), en ocasiones después de una etapa de derivatización, o acoplada a espectrometría de masas (LC-MS/MS), dependiendo del objetivo del análisis y de las características de la muestra.

3. 3. 5. Cromatografía de Gases (GC)

La cromatografía de gases (GC) es una técnica analítica utilizada para separar y estudiar sustancias volátiles y térmicamente estables. Este método emplea un gas portador como fase móvil, que transporta los componentes de la muestra a través de una columna que contiene la fase estacionaria, donde se separan según sus propiedades fisicoquímicas (Janik et al., 2021). Sin embargo, la GC no se utiliza habitualmente para la determinación de aflatoxina B1 (AFB1) en piensos, debido a su baja volatilidad y a las dificultades asociadas con su análisis mediante esta técnica. Por esta razón, para identificar y cuantificar AFB1 se emplean preferentemente métodos como la cromatografía líquida de alta resolución con detección por fluorescencia (HPLC-FLD) y la cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas en tándem (LC-MS/MS), siempre que estén validados para la matriz alimentaria analizada (Smaoui et al., 2023).

3. 3. 6. Cromatografía líquida-espectrometría de masas (LC:MS)

La LC-MS es una técnica moderna, se usa para encontrar y cuantificar aflatoxinas y otras micotoxinas. No usa métodos convencionales como UV/VIS o fluorescencia, esta técnica confirma la identidad de lo que se analiza mejor y funciona uniendo la separación de la cromatografía líquida, también usa la espectrometría de masas. Esta puede hallar sustancias por su relación masa/carga (m/z) dando resultados más claros y confiables. (Zhang and Banerjee, 2020)

La LC-MS es ahora muy importante, porque se usa para analizar micotoxinas debido a que es muy sensible y exacta, pudiendo ver muchas micotoxinas a la vez en una sola muestra. El equipo nuevo incluye LC-MS de triple cuadrupolo (LC-MS-QQQ), reconocido por su gran sensibilidad en análisis cuantitativos (Miklós et al., 2020). Sin embargo, el uso de esta tecnología requiere equipos de alto costo, laboratorios especializados y personal capacitado, lo que limita su aplicación principalmente a centros de investigación y laboratorios avanzados.

3. 3. 7. Métodos inmunoquímicos

Los enfoques inmunoquímicos están basados en un acoplamiento exclusivo y súper específico entre anticuerpos y antígenos, ese encuentro cercano facilita la identificación de sustancias livianas como aflatoxinas con muchísima sensibilidad y exactitud. En cuanto a cómo medimos esa unión, se utilizan variados marcadores acoplados como por ejemplo enzimas, fluorescentes o radiactivos que disparan señales visuales, brillantes o eléctricas susceptibles de medirse con equipos muy precisos (Miklós et al., 2020). Su velocidad, capacidad y habilidad para señalar ínfimas cantidades de impurezas han hecho que estas

herramientas se establezcan firmemente como instrumentos habituales de análisis de calidad en las áreas de alimentos, campo y medicinas.

Una gran ventaja de estos métodos es que son más rápidos, son menos complicados y se necesita preparar menos las muestras, siendo mejor que con otros métodos cromatográficos. Tampoco se necesita personal con mucha preparación especial, lo que lo hace más fácil usarlos en laboratorios comunes. Los métodos inmunoquímicos más usados para aflatoxinas son: el radioinmunoensayo (RIA), está el ensayo inmunoenzimático (ELISA). Y existen las columnas de inmunoafinidad (ICA) o los inmunosensores. Todos se usan ampliamente para detectar y cuantificar micotoxinas presentes en piensos y alimento para animales.

3. 3. 8. Radioinmunoensayo (RIA)

El radioinmunoensayo (RIA) es una prueba de anticuerpos que usa competencia entre un antígeno con radiación contra un antígeno sin radiación, donde ambos buscan lugares en un anticuerpo especial. Entre más haya antígeno sin radiación en una muestra, menos antígeno radiactivo se une al anticuerpo. Este método permite saber cuánta sustancia de aflatoxinas hay haciéndolo con mucha sensibilidad y exactitud. El RIA fue de los primeros inmunoensayos y también se usó para ver aflatoxinas en alimentos, detectando muy bajos niveles de aflatoxina B1 y M1.

Las ventajas del RIA son su gran sensibilidad, que es muy específico y permite analizar muchas muestras a la vez. Pero tiene limitaciones importantes, porque necesita antígenos puros y usar materiales radiactivos como señales. Esto puede ser un riesgo para la salud, además se debe almacenar y retirar desechos radiactivos lo cual cuesta dinero y es difícil de manejar. Por eso, hoy se usa poco para pruebas de aflatoxinas del día a día.

3. 3. 9. Prueba de ELISA

El método ELISA es bastante directo y se utiliza para detectar y cuantificar aflatoxina B1 (AFB1) en muestras de alimentos y piensos. Para el análisis de esta micotoxina se emplea principalmente el formato ELISA competitivo, debido a que la AFB1 es una molécula pequeña. En este procedimiento, la aflatoxina presente en la muestra compite con una aflatoxina de referencia por los sitios de unión de anticuerpos específicos. Posteriormente, se añade un reactivo que permite generar una señal de color, cuya intensidad se mide mediante un lector de microplacas. En este tipo de ensayo, la intensidad del color es inversamente proporcional a la concentración de AFB1 presente en la muestra, es decir, a mayor concentración de aflatoxina, menor intensidad de color (Janik et al., 2021). Una ventaja de esta técnica es que permite analizar varias muestras simultáneamente, por lo que resulta útil como método rápido de tamizaje. Sin embargo, los resultados deben interpretarse considerando las limitaciones del ensayo y, cuando sea necesario, confirmarse mediante técnicas analíticas como HPLC-FLD o LC-MS/MS.

3.10. Dispositivos de flujo lateral (tiras reactivas inmunológicas)

Los dispositivos de flujo lateral son tiras reactivas. Se usan para detectar si hay aflatoxinas con métodos rápidos y funcionan uniendo anticuerpos a antígenos. Esto identifica

las toxinas debido a su buena sensibilidad y especificidad, gracias a una membrana poros que tiene una almohadilla para la muestra y otra almohadilla que absorbe por capilaridad. Mediante el uso de partículas de oro con anticuerpos, dan un color rojo que reaccionan si hay aflatoxinas.

Mediante la aplicación de una muestra líquida previamente preparada sobre la tira reactiva, el líquido se desplaza por la membrana por capilaridad y entra en contacto con los reactivos específicos para la detección de aflatoxinas. Esto permite obtener una señal visible en pocos minutos, dependiendo de las características del dispositivo utilizado. Algunos estudios han demostrado que estas pruebas pueden ser útiles para la detección rápida de aflatoxinas en alimentos y piensos; sin embargo, su sensibilidad y especificidad dependen del fabricante, la matriz analizada y las condiciones de aplicación. Además, pueden presentarse resultados falsos positivos o falsos negativos, por lo que es importante utilizar dispositivos validados para el tipo de muestra y confirmar los resultados cuando sea necesario mediante técnicas como HPLC-FLD o LC-MS/MS (Janik et al., 2021).

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los métodos físicos, especialmente el uso de adsorbentes, se encuentran entre las estrategias estudiadas para mitigar los efectos de la aflatoxina B1 en la alimentación animal, debido a su aplicación práctica en los sistemas productivos (Kolawole et al., 2019). Por otra parte, los métodos biológicos, particularmente aquellos basados en microorganismos como Lactobacillus y Bacillus, han mostrado resultados prometedores en determinadas condiciones experimentales. Asimismo, los métodos químicos, entre ellos la amonización y la ozonización, han sido investigados por su capacidad para degradar la aflatoxina B1 (Agriopoulou et al., 2016). Sin embargo, la eficacia de estas estrategias depende de factores como la concentración inicial de la toxina, el tipo de pienso, las condiciones del tratamiento y la metodología utilizada. Por esta razón, los resultados obtenidos en diferentes investigaciones deben compararse considerando sus condiciones experimentales y las limitaciones para su aplicación en sistemas de producción lechera de la Región del Cesar.

Al comparar las estrategias de mitigación, se identifican diferencias importantes en sus mecanismos de acción. Los adsorbentes, como las bentonitas y otros materiales utilizados en la alimentación animal, actúan mediante la unión de la aflatoxina B1, con el propósito de disminuir su disponibilidad para la absorción en el organismo. Kolawole et al. (2019) evaluaron diferentes aditivos comerciales mediante ensayos in vitro, lo que permite analizar su capacidad de unión a las micotoxinas, aunque estos resultados no garantizan el mismo comportamiento en vacas lecheras. Por otra parte, Agriopoulou et al. (2016) investigaron la degradación de aflatoxinas mediante ozono, una estrategia cuyo mecanismo es diferente al de los adsorbentes, debido a que busca transformar químicamente la toxina. Esta diferencia resulta importante al seleccionar una alternativa de mitigación, ya que no es lo mismo disminuir la absorción de AFB1 que reducir su concentración mediante un tratamiento químico. Además, para su aplicación en los sistemas productivos de la Región del Cesar, deben considerarse los costos,

las condiciones de almacenamiento, la disponibilidad de equipos y la seguridad del tratamiento.

Los resultados analizados muestran que tanto las tiras reactivas inmunológicas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) desempeñan un papel importante en la detección y cuantificación de aflatoxina B1 en piensos. Sin embargo, cada método presenta características particulares que determinan su aplicación dentro de la cadena productiva. Las tiras reactivas permiten realizar pruebas rápidas de tamizaje, mientras que la HPLC, cuando se encuentra debidamente validada, puede utilizarse para la cuantificación y confirmación analítica. Por su parte, ELISA permite analizar varias muestras simultáneamente, aunque sus resultados pueden verse afectados por las características de la matriz y la especificidad de los anticuerpos. Por tanto, la selección del método debe considerar su sensibilidad, precisión, límites de detección, costos y condiciones de aplicación, especialmente en los sistemas productivos de la Región del Cesar (Janik et al., 2021).

De acuerdo con Beyene et al. (2019), la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) constituye una herramienta importante para la detección y cuantificación de aflatoxina B1 en piensos. Desde una perspectiva agroindustrial, se considera conveniente utilizar métodos cromatográficos validados, como HPLC-FLD, para determinar la concentración de AFB1 en muestras de alimentos destinados al ganado lechero. Por otra parte, las tiras reactivas inmunológicas representan una alternativa práctica para realizar pruebas rápidas de tamizaje directamente en el campo, permitiendo identificar muestras con posible contaminación que requieran un análisis confirmatorio. Por tanto, se propone combinar ambas técnicas como una estrategia de vigilancia, utilizando las tiras reactivas para el monitoreo inicial de los piensos y HPLC-FLD para la cuantificación y confirmación de los resultados cuando sea necesario (Zhu et al., 2021).

5. CONCLUSIÓNES.

La aflatoxina B1 (AFB1) representa uno de los principales riesgos para la inocuidad de la cadena láctea, debido a su capacidad de contaminar los piensos destinados a la alimentación de vacas lecheras y transformarse posteriormente en aflatoxina M1 (AFM1), la cual puede ser excretada en la leche y afectar la salud de los consumidores. La revisión realizada permitió identificar que las principales causas de contaminación están asociadas a condiciones inadecuadas de almacenamiento, elevados niveles de humedad y temperatura, deficiencias en las prácticas agrícolas y la utilización de materias primas susceptibles al desarrollo de hongos del género Aspergillus, especialmente *A. flavus* y *A. parasiticus.*

Entre los métodos de mitigación identificados, las estrategias físicas, químicas y biológicas han sido estudiadas por su capacidad para reducir la presencia de aflatoxina B1 en los piensos, aunque su eficacia depende de las condiciones experimentales y del tipo de tratamiento aplicado. Los métodos químicos, especialmente el uso de adsorbentes como bentonitas y zeolitas, representan una alternativa para disminuir la biodisponibilidad de la aflatoxina B1 en el organismo animal, debido a su capacidad para unirse a esta micotoxina (Kolawole et al., 2019). Por otra parte, los métodos biológicos, basados en el empleo de microorganismos como Lactobacillus spp. y Bacillus spp., así como enzimas degradadoras, han mostrado resultados prometedores en determinadas condiciones experimentales. Asimismo, los métodos químicos de degradación, como la ozonización, han sido investigados por su capacidad para transformar la aflatoxina B1, aunque su aplicación requiere evaluar la seguridad de los productos resultantes (Agriopoulou et al., 2016). Sin embargo, no es posible establecer que uno de estos métodos sea el más eficaz de manera general, debido a las diferencias entre las condiciones de los estudios analizados.

La revisión también evidenció la importancia de las estrategias analíticas y de monitoreo para garantizar el control de la contaminación por aflatoxinas. Técnicas como ELISA, HPLC,

LC-MS y otros métodos cromatográficos permiten detectar y cuantificar niveles mínimos de AFB1 y AFM1 en piensos y leche, facilitando la toma de decisiones oportunas y el cumplimiento de las normativas sanitarias nacionales e internacionales.

Finalmente, se concluye que la mitigación de la aflatoxina B1 requiere un enfoque integral que combine buenas prácticas agrícolas, adecuado manejo y almacenamiento de los piensos, aplicación de estrategias de prevención y métodos de reducción de la exposición a esta micotoxina, así como sistemas permanentes de vigilancia y monitoreo. Estas estrategias pueden incluir la descontaminación, mediante tratamientos que disminuyan la presencia de AFB1; la adsorción, que busca reducir su biodisponibilidad; y la degradación, que modifica su estructura química. Sin embargo, esta última no garantiza por sí sola una disminución de la toxicidad, por lo que debe evaluarse la seguridad de los productos generados. La implementación de estas medidas en la Región del Cesar podría contribuir a mejorar la calidad e inocuidad de la leche, fortalecer la competitividad del sector lácteo y proteger la salud animal y humana.

6. REFERENCIAS

Abbas, M. (2021). Chromatographic techniques for estimation of aflatoxins in food commodities. *IntechOpen*. https://doi.org/10.5772/intechopen.98508

Agriopoulou, S., Koliadima, A., Karaiskakis, G. y Kapolos, J. (2016). Kinetic study of aflatoxins' degradation in the presence of ozone. *Food Control, 61*, 221–226. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.013

Allen, S. C., Compart, D. M., Russo, K., Kelly, K. M. y Ward, S. (2019). Reduction of aflatoxin M1 in milk of Holstein cows administered a clay adsorbent. *American Association of Bovine Practitioners Proceedings of the Annual Conference, 2019*. https://doi.org/10.21423/aabppro20197277

Alshannaq, A. y Yu, J.-H. (2017). Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 14*(6), Article 632. https://doi.org/10.3390/ijerph14060632

Álvarez-Días, F., Torres-Parga, B., Valdivia-Flores, A. G., Quezada-Tristán, T., Alejos-De La Fuente, J. I., Sosa-Ramírez, J. y Rangel-Muñoz, E. J. (2022). Aspergillus flavus and total aflatoxins occurrence in dairy feed and aflatoxin M1 in bovine milk in Aguascalientes, Mexico. Toxins, 14(5), Article 292. https://doi.org/10.3390/toxins14050292

AOAC International. (2019). *Official methods of analysis of AOAC International* (G. W. Latimer, Jr., Ed.; 21.ª ed.). AOAC International.

Aslam, N., Rodrigues, I., McGill, D. M., Warriach, H. M., Cowling, A., Haque, A. y Wynn, P. C. (2016). Transfer of aflatoxins from naturally contaminated feed to milk of Nili-Ravi buffaloes fed a mycotoxin binder. *Animal Production Science, 56*(10), 1637–1642. https://doi.org/10.1071/AN14909

Basso, K. R., dos, S. P. R., Carla, D. G., Silva, N. P. d. y Guerra, L. R. (2020). Bactérias ácido

lácticas na descontaminação de aflatoxinas em leite bovino: Uma revisão. *Ciência, Tecnologia e Inovação: Do Campo à Mesa*, 797–817. https://doi.org/10.31692/978-65-88970-00-3.v.2.797-817

Beyene, A. M., Du, X., Schrunk, D. E., Ensley, S. y Rumbeiha, W. K. (2019). High-performance liquid chromatography and enzyme-linked immunosorbent assay techniques for detection and quantification of aflatoxin B1 in feed samples: A comparative study. *BMC Research Notes, 12*(1), 1–6. https://doi.org/10.1186/s13104-019-4538-z

Blanco, M., Ramos, A. J., Prim, M., Sanchis, V. y Marín, S. (2020). Usefulness of the analytical control of aflatoxins in feedstuffs for dairy cows for the prevention of aflatoxin M1 in milk. *Mycotoxin Research, 36*(1), 11–22. https://doi.org/10.1007/s12550-019-00362-y

Ceniti, C., Costanzo, N., Spina, A. A., Rodolfi, M., Tilocca, B., Piras, C., Britti, D. y Morittu, V. M. (2021). Fungal contamination and aflatoxin B1 detected in hay for dairy cows in South Italy. *Frontiers in Nutrition, 8*, Article 704976. https://doi.org/10.3389/fnut.2021.704976

Comisión Europea. (2023). *Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión, de 25 de abril de 2023, relativo a los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos*. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj/spa

Daniso, E., Pascon, G., Uboni, C. y Tulli, F. (2024). A preliminary study on the degradation of AFB1 by *Tenebrio molitor*, *Rhizopus oryzae* and *Trichoderma reesei*. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1–11. https://doi.org/10.1163/23524588-00001286

Deng, Z., Jang, K. B., Jalukar, S., Du, X. y Kim, S. W. (2023). Efficacy of feed additive containing bentonite and enzymatically hydrolyzed yeast on intestinal health and growth of newly weaned pigs under chronic dietary challenges of fumonisin and aflatoxin. *Toxins, 15*(7), Article 433. https://doi.org/10.3390/toxins15070433

Díaz Basto, B. X., Chávez Galvis, J. y Dodino Duarte, I. (2024). Evaluación de presencia de *Aspergillus* spp. en piensos para ganado en época de sequía en Aguachica - Colombia. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria, 22*(1), 139–151. https://doi.org/10.24054/limentech.v22i1.2871

Enespa y Chandra, P. (2022). Aflatoxins: Food safety, human health hazards and their prevention. En *Aflatoxins - Occurrence, detoxification, determination and health risks*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.96647

European Food Safety Authority. (2021). Scientific opinion on the safety and efficacy of bentonite as a feed additive for all animal species. *EFSA Journal, 19*(2), Article 6458. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2021.6458

Ferrari, L., Fumagalli, F., Rizzi, N., Grandi, E., Vailati, S., Manoni, M., Ottoboni, M., Cheli, G. y Pinotti, L. (2022). An eight-year survey on aflatoxin B1 indicates high feed safety in animal feed and forages in Northern Italy. *Toxins, 14*(11), Article 763.

Frisvad, J. C., Hubka, V., Ezekiel, C. N., Hong, S.-B., Nováková, A., Chen, A. J., Arzanlou, M., Larsen, T. O., Sklenář, F., Mahakarnchanakul, W., Samson, R. A. y Houbraken, J. (2019). Taxonomy of *Aspergillus* section *Flavi* and their production of aflatoxins, ochratoxins and other mycotoxins. *Studies in Mycology, 93*, 1–63. https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.06.001

Gao, B., An, W., Wu, J. y Wang, X. (2024). Simultaneous degradation of AFB1 and ZEN by CotA laccase from *Bacillus subtilis* ZJ-2019-1 in the mediator-assisted or immobilization system. *Toxins, 16*(10), Article 445. https://doi.org/10.3390/toxins16100445

Gizachew, D., Szonyi, B., Tegegne, A., Hanson, J. y Grace, D. (2016). Aflatoxin contamination of milk and dairy feeds in the Greater Addis Ababa milk shed, Ethiopia. *Food Control, 59*, 773–779. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.06.060

Gonda, M., Rufo, C., Gonzalez-Andujar, J. L. y Vero, S. (2024). Mitigating aflatoxin B1 in

high-moisture sorghum silage: *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin B1 prediction. *Frontiers in Microbiology, 15*, Article 1360343. https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1360343

Gong, Y. Y., Cardwell, K., Hounsa, A., Egal, S., Turner, P. C., Hall, A. J. y Wild, C. P. (2022). Dietary aflatoxin exposure and impaired growth in young children from Benin and Togo: Cross sectional study. *BMJ, 325*(7354), 20–21. https://doi.org/10.1136/bmj.325.7354.20

González, J. J. P., León, S. V. y, Tolentino, R. G., Bermúdez, B. S. S., Solis, F. I. M. y Medina, A. C. E. (2021). Presencia de aflatoxina B1 en alimentos para cabras en unidades de producción de leche caprina del altiplano mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias, 12*(2), 598–608. https://doi.org/10.22319/rmcp.v12i2.4856

Instituto Colombiano Agropecuario. (2020, 3 de diciembre). *Resolución 061252 de 2020: Por medio de la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el registro de los fabricantes e importadores de alimentos para animales, así como los requisitos y el procedimiento para el registro de alimentos para animales y se dictan otras disposiciones*. ICA. https://www.ica.gov.co/normatividad/normas-ica/resoluciones-oficinas-nacionales/2020/2020r61252

International Agency for Research on Cancer. (2012). *Chemical agents and related occupations* (IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Vol. 100F). https://publications.iarc.who.int/123

Janik, E., Niemcewicz, M., Podogrocki, M., Ceremuga, M., Gorniak, L., Stela, M. y Bijak, M. (2021). The existing methods and novel approaches in mycotoxins' detection. *Molecules, 26*(13), Article 3981. https://doi.org/10.3390/molecules26133981

Javiera, C. K., Pedro, E. A., Leonardo, S. I. y Carolina, V. V. (2017). *Aplicaciones de*

metodologías analíticas para detectar y cuantificar AFB1, en piensos, creando un diseño de monitoreo en la producción avícola de la Provincia de Huambo, Angola [Tesis]. Universidad de Chile. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/146608

Juárez, G. G., Vázquez, M. H., Bolaños, H. O. y González, G. S. (2019). Agroquímicos y presencia de aflatoxinas en maíz de temporal almacenado: Riesgos para la seguridad alimentaria en el estado de Tlaxcala, México. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias, 8*(16), 106–130. https://doi.org/10.23913/ciba.v8i16.93

Kolawole, O., Meneely, J., Greer, B., Chevallier, O., Jones, D. S., Connolly, L. y Elliott, C. (2019). Comparative in vitro assessment of a range of commercial feed additives with multiple mycotoxin binding claims. *Toxins, 11*(11), Article 659. https://doi.org/10.3390/toxins11110659

Lavkor, I., Arioğlu, H., Var, I. y Öztemiz, S. (2019). Biological control of aflatoxigenic fungi on peanut: For the pre-harvest approach. *Turkish Journal of Field Crops, 24*(1), 21–27. https://doi.org/10.17557/tjfc.562634

Liu, M., Zhao, L., Gong, G., Zhang, L., Shi, L., Dai, J., … Sun, L. (2022). Invited review: Remediation strategies for mycotoxin control in feed. *Journal of Animal Science and Biotechnology, 13*(1). https://doi.org/10.1186/s40104-021-00661-4

Liu, Y., Xia, L., Yamdeu, J. H. G., Gong, Y. Y. y Orfila, C. (2024). Adsorption of aflatoxin B1 to corn by-products. *Food Chemistry, 440*, Article 138212. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138212

Mahmoud, Y. A., Elkaliny, N. E., Darwish, O. A., Ashraf, Y., Ebrahim, R. A., Das, S., … Yahya, G. (2025). Comprehensive review for aflatoxin detoxification with special attention to cold plasma treatment. *Mycotoxin Research*. https://doi.org/10.1007/s12550-025-00582-5

Mendes, J. M., Cazal, C., Rojas, C. B. d. y Alvarenga, A. A. A. (2023). Evaluación del potencial aflatoxigénico de aislados de *Aspergillus flavus* en modelo de maíz *in vitro*. *Acta Biológica Colombiana, 28*(1), 135–142. https://doi.org/10.15446/abc.v28n1.96919

Mengesha, G., Bekele, T., Ashagrie, H. y Woldegiorgis, A. Z. (2023). *Level of aflatoxins in dairy feeds, poultry feeds and feed ingredients produced by feed factories in Addis Ababa, Ethiopia* [Preprint]. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3438157/v1

Miklós, G., Angeli, C., Ambrus, A. y Szabó-Fodor, B. (2020). Detection methods for aflatoxin M1 and total aflatoxins in dairy products. *Microorganisms, 8*(2), Article 246. https://doi.org/10.3390/microorganisms8020246

Ministerio de Salud y Protección Social. (2013). *Resolución 4506 de 2013, por la cual se establecen los niveles máximos de contaminantes en los alimentos destinados al consumo humano*. https://normograma.supersalud.gov.co/compilacion/docs/resolucion_minsaludps_4506_2013.htm

Mohanamba, T., Priyanka, M. V., Kumari, L. y Kumar, R. A. (2024). Aflatoxin contamination of livestock feeds and feed ingredients in Andhra Pradesh. *The Indian Veterinary Journal, 101*(10), 26–27. https://doi.org/10.62757/iva.2024.101.10.26-27

Blanco-Lizarazo, C. M., Gamboa-Marín, A., Vega, S., Jiménez-Rodríguez, L. P., & B, I. C. S. (2019, May 29). *Assessment of dietary exposure to aflatoxin B1 from corn arepas in Colombia*. Food Additives & Contaminants: Part A; Taylor & Francis. https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19440049.2019.1615643

Mostafa, T. y Yousif, A. (2025). Potential using zeolite, yeast and milk thistle in reducing harmful effect of mycotoxins in broiler diets. *IOP Conference Series: Earth and*

Environmental Science, 1449(1), Article 012006. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1449/1/012006

Nguyen, T., Flint, S. y Palmer, J. (2020). Control of aflatoxin M1 in milk by novel methods: A review. *Food Chemistry, 311*, Article 125984. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125984

Noronha, M. V. P., Alencar, R. d. N. d., Costa, J. C. y Bachur, T. P. R. (2020). Exposição crônica a aflatoxina B1 e oncogênese do carcinoma hepatocelular. *Revista Intertox de Toxicologia, Risco Ambiental e Sociedade, 13*(3), 29–41. https://doi.org/10.22280/revintervol13ed3.480

Okpara, M., Ozioko, C. A. y Chah, F. (2021). Evaluation of aflatoxin B1 in poultry feeds marketed in Nsukka agricultural zone, Enugu State, South Eastern Nigeria. *Journal of Sustainable Veterinary and Allied Sciences*, 110–116. https://doi.org/10.54328/covm/josvas.2021.016

Onesmo, A. R., Frida, A. N. y Alex, N. W. (2024). Assessment of aflatoxins awareness in animal feeds and fresh milk among smallholder dairy farmers in Kondoa district, Dodoma Tanzania. *Journal of Agriculture and Food Research, 16*, Artículo 101051. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101051

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2001). *Manual on the application of the HACCP system in mycotoxin prevention and control* (FAO Food and Nutrition Paper No. 73). https://www.fao.org/4/y1390e/y1390e00.htm

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2019). *Animal nutrition: Feeding and feed management*. https://www.fao.org

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J.,

Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Alonso-Fernández, S. (2021). Declaración PRISMA 2020: Una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas. *Revista Española de Cardiología, 74*(9), 790–799. https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016

Patyal, A., Gill, J. P. S., Bedi, J. S. y Aulakh, R. S. (2021). Assessment of aflatoxin contamination in dairy animal concentrate feed from Punjab, India. *Environmental Science and Pollution Research, 28*(28), 37705–37715. https://doi.org/10.1007/s11356-021-13321

Pichardo-Matamoros, D. J. y Elizondo-Salazar, J. A. (2020). Impacto de las aflatoxinas B1/M1 sobre el bienestar de las vacas lecheras y su presencia en productos lácteos. *Nutrición Animal Tropical, 14*(2), 156–186. https://doi.org/10.15517/nat.v14i2.44842

Pleadin, J., Frece, J. y Markov, K. (2019). Mycotoxins in food and feed. *Advances in Food and Nutrition Research, 89*, 297–345. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.02.007

Reyna-Gallegos, S. L. y Arteaga, J. (2022). Riesgos de contaminación química en leche y sus derivados. *La Granja, 36*(2). https://doi.org/10.17163/lgr.n36.2022.10

Sevim, S., Macit, A., Sancak, B. y Kizil, M. (2024). Mitigación de la aflatoxina M1 por nuevos agentes biológicos y evaluación de la bioaccesibilidad con digestión enzimática en la leche.

Sharafi, K., Kiani, A., Omer, A. K., Parnoon, K. y Massahi, T. (2024). Importance of rigorous and ongoing monitoring of animal feed quality and storage conditions to mitigate aflatoxin M1 contamination in dairy products in Iran: A health policy brief. *Journal of Health Reports and Technology, 10*(2). https://doi.org/10.5812/jhrt-146654

Smaoui, S., D'Amore, T., Tarapoulouzi, M., Agriopoulou, S. y Varzakas, T. (2023). Aflatoxins contamination in feed commodities: From occurrence and toxicity to recent advances in analytical methods and detoxification. *Microorganisms, 11*(10), Article 2614. https://doi.org/10.3390/microorganisms11102614

Tarazona-Manrique, L. E., Andrade-Becerra, R. J. y Vargas-Abella, J. C. (2020). Detección de aflatoxina M1 en muestras de leche cruda de vacas en tanques de enfriamiento en Boyacá (Colombia). *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, 67*(3), 219–229. https://www.redalyc.org/journal/4076/407668267003/html/

Tekin, S. y Leblebici, Z. (2022). Investigation for contaminations of raw milk on milk collection units in Nevsehir province. *Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi - C Yaşam Bilimleri ve Biyoteknoloji, 11*(2), 57–65. https://doi.org/10.18036/estubtdc.1121512

Turner, P. C., Collinson, A. C., Cheung, Y. B., Gong, Y. Y., Hall, A. J., Prentice, A. M. y Wild, C. P. (2017). Aflatoxin exposure in utero causes growth faltering in Gambian infants. *International Journal of Epidemiology, 36*(5), 1119–1125. https://doi.org/10.1093/ije/dym122

U.S. Food and Drug Administration. (2005). *CPG Sec. 527.400 Whole milk, lowfat milk, skim milk – Aflatoxin M1*. https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/cpg-sec-527400-whole-milk-lowfat-milk-skim-milk-aflatoxin-m1

Velarde Escobar, K., Ramón, P., Román Cárdenas, F. y Díaz Monroy, B. L. (2023). Detección de micotoxinas (aflatoxinas) en alimentos primarios y procesados para humanos y animales de granja, en Riobamba-Ecuador. *Siembra, 10*(1), Article e4126. https://doi.org/10.29166/siembra.v10i1.4126

Wild, C. P. y Gong, Y. Y. (2020). Mycotoxins and human disease: A largely ignored global health issue. *Carcinogenesis, 31*(1), 71–82. https://doi.org/10.1093/carcin/bgp264

Zentai, A., Jóźwiak, Á., Süth, M. y Farkas, Z. (2023). Carry-over of aflatoxin B1 from feed to cow milk—A review. *Toxins, 15*(3), Article 195. https://doi.org/10.3390/toxins15030195

Zhang, K. y Banerjee, K. (2020). A review: Sample preparation and chromatographic

technologies for detection of aflatoxins in foods. *Toxins, 12*(9), Article 539. https://doi.org/10.3390/toxins12090539

Zhao, L., Sheng, X., Li, S., Yan, W., Qian, J., Wang, J., Zhang, J. y Raghavan, V. (2024). Assessment of non-thermal plasma for decontamination against *Aspergillus flavus* and aflatoxin B1 in maize. *Food Control, 163*, Article 110521. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110521

Zhu, F., Zhang, B. y Zhu, L. (2021). An up-converting phosphor technology-based lateral flow assay for rapid detection of major mycotoxins in feed: Comparison with enzyme-linked immunosorbent assay and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *PLOS ONE, 16*(4), Article e0250250. https://doi.org/10.1371/journal.pone.025025

ANEXOS

Anexo 1: matriz de revisión documental elaborada siguiendo los lineamientos de PRISMA 2020.

En el Anexo 1 se presenta la matriz de revisión documental elaborada en Microsoft Excel para la organización, sistematización y análisis de la información obtenida durante el proceso de revisión bibliográfica, siguiendo los lineamientos establecidos por la metodología PRISMA 2020. La matriz permitió registrar y clasificar los estudios seleccionados de acuerdo con criterios como autor, año de publicación, metodología empleada, tipo de estudio, estrategias de mitigación de aflatoxina B1 (AFB1), principales hallazgos y su relación con la transformación de AFB1 a aflatoxina M1 (AFM1) en la leche.

Esta herramienta facilitó la comparación de los estudios incluidos y permitió identificar las principales estrategias de mitigación reportadas en la literatura científica, así como su posible aplicación en contextos agroindustriales y productivos similares a las condiciones de la región del Cesar.