

# UTILIZACIÓN DE HONGOS DE PUDRICIÓN BLANCA EN LA BIOCONVERSIÓN DE FORRAJES, PARA MEJORAR SU DIGESTIBILIDAD EN RUMIANTES

Virginia Guadalupe García Rubio<sup>1</sup>, Gabriela Rodríguez Licea<sup>2</sup> y Juan José Ojeda Carrasco<sup>3</sup>

## Introducción

La creciente demanda de alimentos de origen animal, ha estado ejerciendo fuertes presiones sobre los sistemas de producción pecuaria, para desarrollar procesos más eficientes a través de la aplicación de diversos desarrollos tecnológicos e innovación, con el objeto de que la crianza de los animales eleve su productividad, a niveles capaces de atender las exigencias de consumo actuales. Para tal fin, se tiende a privilegiar a los sistemas de producción intensiva, como la vía para controlar las condiciones físicas y de acondicionamiento que garanticen el bienestar animal, la dotación de una alimentación y nutrición adecuada, balanceada y equilibrada, a base de alimentos naturales y concentrados; e incluso, suplementos dietéticos y aditivos alimenticios comerciales, como prebióticos, probióticos, enzimas, ácidos orgánicos y extractos vegetales, para modificar la digestión de nutrientes, la fermentación ruminal y los metabolitos sanguíneos, como base para promover la optimización de la eficiencia productiva de los rumiantes (Carro *et al.*, 2006; Malekkhahi *et al.*, 2015; Shen *et al.*, 2018).

A pesar de que los sistemas intensivos, ofrecen estas ventajas productivas, del mismo modo presentan ciertas áreas de oportunidad, relacionadas con los costos que implica esta producción ventajosa; no sólo en términos de economía, por las inversiones que deben realizarse para la construcción de instalaciones especializadas (áreas de confinamiento, corrales, bebederos), la utilización de recursos como agua, energía eléctrica, implementos para el control de la humedad y temperatura (calefactores o ventiladores), el equipo y maquinaria empleado en la producción, procesamiento y/o traslado de los alimentos; sino también ambientales, por

---

<sup>1</sup> Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Centro Universitario UAEM Amecameca, Universidad Autónoma del Estado de México. **Autor de correspondencia:** [vggarcia@uaemex.mx](mailto:vggarcia@uaemex.mx)

<sup>2</sup> Doctora en Ciencias. Centro Universitario UAEM Amecameca, Universidad Autónoma del Estado de México. [grodriguezl@uaemex.mx](mailto:grodriguezl@uaemex.mx)

<sup>3</sup> Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Centro Universitario UAEM Amecameca, Universidad Autónoma del Estado de México. [jjjedac@uaemex.mx](mailto:jjjedac@uaemex.mx)

las emisiones generadas por la operación de tractores y otros vehículos a gasolina o diésel, las derivadas del uso de fertilizantes y suplementos alimenticios ricos en nitrógeno y fósforo, como fuentes de contaminación, entre otros.

Desde cualquier arista que se analice a estos sistemas productivos, es un hecho innegable que las condiciones prevaletientes en México, como en la mayoría de los países Latinoamericanos, abren una brecha significativa para que éstos sean asequibles en todos los territorios de la región. Este tipo de sistema productivo existe en el país, representado principalmente por la industria lechera, en la cuenca Lagunera o Región de La Laguna, con los Distritos de Desarrollo Rural Laguna Coahuila y Laguna Durango, y recientemente Querétaro; así como los sistemas de doble propósito, ubicados en zonas tropicales, principalmente en Chiapas y el norte de Veracruz. En estos sistemas se realizan cuidadosos procesos integrales que van desde la producción y aprovechamiento de forraje, que involucra la selección de las especies forrajeras, el establecimiento de los cultivos y su manejo agronómico, el diseño de un programa de alimentación a través el balanceo de raciones y un monitoreo permanente de la respuesta de los rumiantes, cuyo objetivo es generar y mantener altos volúmenes de producción, mediante el consumo de grandes cantidades de materia seca, la optimización tanto de la fermentación ruminal como del metabolismo del animal, la suplementación de nutrientes de alta calidad que escapen a la fermentación en el rumen, a fin de complementar los requerimientos nutricionales que mantengan la salud animal y su eficiencia reproductiva (Núñez *et al.*, 2009; Maycotte, 2011; Camacho *et al.*, 2017; CEDRSSA, 2020).

En México, como en toda América Latina, los sistemas de producción animal más ampliamente diseminados, corresponden a los sistemas convencionales, tradicionales o extensivos, en los que se combina la crianza de animales con la agricultura, lo que permite que los animales se alimenten de los esquilmos agrícolas (tallos y hojas que quedan en los terrenos de cultivo después de que se cosechan los granos), algunas proporciones de la cosecha reservadas para este propósito, como granos o mazorcas de maíz, cultivos especialmente destinados a la alimentación de los animales que se suministran ya sea frescos o procesados mediante ensilaje, así como los forrajes resultantes de la cosecha, procesados como heno, paja o pacas de zacate elaboradas con la molienda de tallos y hojas secas; que son complementados, en muchos casos, con concentrados elaborados de forma industrial, aunque en bajas cantidades.

En este sistema, los procesos de tecnificación tienden a ser más bien bajos, aunque puede encontrarse toda una gama al respecto, con unidades de producción en donde esta tecnificación está ausente, por lo que la crianza de los animales se realiza de forma tradicional, en la que la

alimentación de los animales consiste casi de forma exclusiva de los pastos y hierbas consumidos por los animales durante el pastoreo, o esquilmos; otros que además de este pastoreo, complementan la alimentación con el uso de forrajes procesados de forma manual (picados), hasta aquellos en los que se utilizan molinos, y otros implementos como trilladoras y ordeñadoras, lo cual está en estrecha relación con la disponibilidad de recursos de los productores. Las diferencias también suelen reflejarse en las condiciones de estabulación de los semovientes, que van desde solares (áreas del terreno de cultivo adyacentes a las viviendas) acondicionados con cercas improvisadas con troncos y ramas, instalaciones rústicas con piso de tierra ubicados en patios traseros, hasta áreas que han sido acondicionadas con comederos, bebederos, con techados parciales y áreas a cielo abierto y pisos de cemento, en los que además las áreas de descanso están separadas de aquellas destinadas para la alimentación.

Una característica de los sistemas extensivos, es que por lo general representan actividades secundarias a la agricultura, que son realizadas a pequeña escala, con unos cuantos animales a disposición, y como una forma de darle uso a los residuos de los cultivos. Son sistemas que se emplean como complemento de la economía familiar, en los que la mano de obra de los integrantes de la familia, reditúa en su beneficio al mejorar su alimentación familiar, por ejemplo, por la disponibilidad y acceso a la leche bovina, pero también porque se generan ingresos adicionales por la venta de este producto, que son de utilidad para cubrir otras necesidades como mejoras a la vivienda, atención médica, vestimenta y transporte. Estos sistemas son muy importantes en las comunidades rurales, ya que se estima que cerca de 2/3 de la población se dedica a este tipo de actividades (Améndola-Massiotti *et al.*, 2005; Parsons *et al.*, 2011; Jiménez, Espinosa y Soler, 2014; Vázquez-García, 2015).

No obstante, los sistemas extensivos también presentan áreas de oportunidad, ya que si bien representan una forma de economía circular en donde se da uso tanto a los productos de los cultivos, como a sus residuos en esta integración agricultura-ganadería, esto también tiende a demeritar la calidad de la alimentación que reciben los animales, por lo que es muy común que presenten diferentes grados de desnutrición, no sólo por las porciones reducidas de alimento, sino por el gasto metabólico que deben realizar para procesarlo. Dentro de las fortalezas, está el hecho de que a diferencia de los otros animales domésticos (que requieren alimentarse de frutas, verduras, granos y cereales), los rumiantes no establecen una competencia por los alimentos destinados a la alimentación humana, pues pueden alimentarse de aquellas partes del cultivo no consumibles como las hojas y tallos secos, debido a que tiene una digestión fermentativa pregástrica del alimento, que los capacita para convertir los carbohidratos fibrosos en nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo, utilizar de manera eficiente alimentos bajos en proteínas y nitrógeno no

proteico en el rumen para sintetizar proteínas con un alto valor biológico para el consumo humano (carne y leche), convertir los carbohidratos de los alimentos fibrosos en nutrientes que pueden usarse para llevar a cabo funciones de trabajo (fuerza de tiro), emplear la proteína de la dieta para la síntesis de tejidos de manera más eficiente que los animales monogástricos, siempre que esté en una forma protegida del ataque microbiano en el rumen, pero digerible por las enzimas gástricas e intestinales, entre otros. Así, si bien pueden realizar todas estas funciones, se ha visto que los procesos resultan en impactos negativos, ya que la digestión fermentativa es llevada a cabo por microorganismo presentes en el rumen que además de participar en la síntesis proteica, son generadores de metano (un gas de efecto invernadero), además de los altos costos que el proceso representa en términos de consumo de energía metabólica (en forma de ATP), que pudiera ser empleada para otros procesos más redituables, como el incremento de la masa muscular, o la producción de leche.

Dentro de las estrategias que se proponen para aumentar la eficiencia de los atributos de los rumiantes en condiciones prácticas que atañen a los pequeños y medianos productores, se encuentran:

1. Alterar la base del alimento para proporcionar una mejor cantidad y equilibrio de nutrientes al animal, manipulando los procesos digestivos fermentativos, gástricos y posgástricos, para extraer un mayor y mejor balance de nutrientes para el animal del alimento basal.
2. La manipulación de la eficiencia de la partición de los nutrientes absorbidos en los procesos productivos, incluidos aquellos que están involucrados en la productividad de por vida.
3. Eliminando o mejorando las limitaciones que son parte del medio ambiente (principalmente enfermedades, pero también los efectos del estrés por temperatura y humedad).
4. Aumentar la base de alimentación con nutrientes críticamente deficientes que pueden producirse localmente, particularmente a partir de fuentes no convencionales.
5. Disminuir la fermentabilidad de las proteínas de las plantas consumidas por los rumiantes mediante la ingeniería genética de las plantas y otras técnicas aplicadas a la planta, al sistema de digestión microbiana y al animal (Leng, 1991).

A propósito, se recuperó esta última referencia generada en el marco del programa de Producción y Sanidad Animal de la FAO, el cual ha sido la base de programas subsecuentes impulsados por este organismo internacional, para buscar alternativas en los países en desarrollo que permitan incrementar la eficiencia productiva de los rumiantes, a través

de la introducción de procesos de manipulación y mejora de la calidad de los alimentos, a partir de los recursos alimenticios disponibles para los rumiantes. Esto es muy importante, ya que como se mostrará más adelante, estas recomendaciones han dado paso al desarrollo de diversas investigaciones que buscan incidir sobre esta temática, desarrollando diferentes opciones, muchas de las cuales, si bien han mostrado contribuir con este objetivo, también han quedado reducidas en su aplicación por las limitaciones económicas presentes en distintas comunidades en donde se desarrolla esta actividad.

## **Alimentación de rumiantes y composición nutrimental de los forrajes**

El crecimiento, desarrollo, peso corporal y mantenimiento de las funciones metabólicas, en los animales depende enteramente de la alimentación. Gran parte de la energía que los animales requieren para su subsistencia y producción, proviene de las plantas por su contenido en proteínas, carbohidratos y lípidos (macronutrientes); así como de minerales, vitaminas (micronutrientes) y agua.

Las proteínas contienen Nitrógeno (N), elemento indispensable para el desarrollo y mantenimiento del cuerpo, así como para la producción de carne y leche. La proteína cruda presente en los alimentos y forrajes para rumiantes, comprende tanto a la denominada «proteína verdadera», como a las fuentes de Nitrógeno No Proteico (NNP). Las proteínas verdaderas, se encuentran en altas concentraciones en las hojas verdes y porciones blandas de las plantas, de modo que cuando se van secando, el contenido de proteínas tiende a disminuir. Estos macronutrientes cumplen diferentes funciones en el cuerpo del animal, ya que además de ser indispensables para el desarrollo corporal, crecimiento y reproducción, también lo son para el adecuado funcionamiento hormonal y enzimático, la producción de leche, la generación de resistencia ante algunas enfermedades, así como son constitutivas de cuernos, pelo y pezuñas.

El contenido de proteínas varía entre un alimento y otro proporcionado a los rumiantes, en niveles que van desde el bajo, como la paja de avena que aporta del 3 al 5% de proteína cruda, el heno de pradera (7-16%); medio, como el heno de alfalfa (11-19%), el ensilaje de pradera (8-22%) o los pastos verdes de pradera (17-30%); en el nivel más alto, se ubican las pastas o tortas (los principales residuos industriales generados después de la extracción de aceites) de la canola u otras leguminosas, que pueden aportar de 28-50% de proteína cruda.

Por su parte, el nitrógeno no proteico es abundante en la etapa de crecimiento de las plantas, llegando a representar hasta 1/3 del nitrógeno total en los forrajes de gramíneas y henos que son cortados tiernos. En las pasturas tiernas, el contenido de NNP puede oscilar entre el 25 y 30%. En

los ensilados, gran parte del nitrógeno está en forma de NNP, integrado tanto por el contenido del forraje cosechado, como del proveniente del proceso de fermentación, producido por la hidrólisis de proteínas en aminoácidos. El NNP, es fuente de nitrógeno fermentable que es utilizado por los microorganismos alojados en el rumen para la síntesis de proteínas que requieren los rumiantes; a diferencia de las proteínas verdaderas, el aporte de energía al animal es nulo o muy reducido; están integrados por:

1. Compuestos nitrogenados solubles: como los aminoácidos libres (silares o unidad mínima de composición de las proteínas), los nitratos (base para la síntesis proteica en las plantas), las amidas (derivados de los ácidos carboxílicos), las aminas (derivados del amoniaco) y los ácidos nucleicos (cadenas poliméricas: ADN y ARN).
2. Compuestos nitrogenados insolubles como el nitrógeno proteico, pero que es degradable en el rumen.
3. Compuestos que no pueden ser degradados en el rumen pero que son digeribles en el intestino.
4. Compuestos nitrogenados que por estar ligados a la lignina (caramelizados) no son digeribles.

Esta síntesis microbiana de proteínas en el rumen (sistema anaerobio), es lo que confiere a los rumiantes la capacidad de subsistir con alimentos de bajo contenido proteico como los forrajes, al proporcionar al intestino delgado los aminoácidos indispensables para las necesidades de los tejidos del animal, por lo que son menos dependientes del consumo de alimentos ricos en proteína. Estas proteínas ruminales, tienen un mayor valor biológico que la de muchos de los vegetales, por lo que complementan las fracciones de proteínas contenidas en los alimentos que escapan de la digestión en el rumen, en la formación de los aminoácidos esenciales.

Respecto a los carbohidratos, las plantas integran dos tipos de estos nutrientes, los que son solubles como los azúcares y el almidón, con un alto grado de digestibilidad, y que, por tanto, son fácilmente asimilados y utilizados por el animal, presentes principalmente en las hojas; y la fibra, presente en el tallo, compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que dificulta que el animal pueda digerirla, y sólo pueden hacerlo por los microorganismos presentes en el rumen de bovinos, ovinos y caprinos. A pesar de la baja digestibilidad, la fibra es necesaria en la dieta de los rumiantes (como mínimo de 30-35%), para que el rumen pueda funcionar adecuadamente. Sin embargo, un alto contenido de fibra, tiende a generar que los rumiantes realicen una menor ingesta de alimento.

Las principales funciones de los carbohidratos son: aporte de energía para el mantenimiento del cuerpo y el desarrollo de diferentes actividades del organismo (locomoción, pastoreo, producción de leche, entre otras), mantener los niveles de glucosa en la sangre y la temperatura corporal, y, especialmente, son indispensables para la multiplicación

y crecimiento de los microorganismos alojados en el rumen. Los excedentes de carbohidratos que no son utilizados, se almacenan como grasa corporal a manera de reserva de energía. Al igual que las proteínas, los contenidos de carbohidratos solubles, como de fibra pueden variar en los diferentes alimentos empleados para los rumiantes. En los de bajo contenido de carbohidratos solubles, los pastos verdes y ensilados proporcionan del 5-20%, en el nivel medio las pastas de oleaginosas (20-40%) en tanto que los mayores porcentajes corresponden a los cereales (60-70%) y a la melaza (62%). En cuanto al contenido de fibra detergente neutra (FDN), los subproductos de cereales se ubican en un nivel bajo ya que sólo aportan entre el 22 y 25%, en un nivel medio están el forraje verde fresco (38-45%), el heno y los forrajes secos (37-63%), en tanto que, en un nivel alto está la paja (64.83%).

En cuanto a los lípidos, en los forrajes se encuentran en bajas cantidades que van de los 30 a los 100 g/Kg de MS (Materia Seca). En términos de composición, los forrajes contienen alrededor del 50% de galactolípidos (un tipo de glucolípidos en los que el carbohidrato es la galactosa), el 33% de lípidos simples, que incluyen ceras, diglicéridos y ácidos grasos; y el 17% restante está formado por fosfolípidos. En los forrajes frescos la mayor proporción (entre 50 y 75%) corresponde al ácido  $\alpha$ -linolénico, aunque se ha observado que las diferencias en las concentraciones dependen del tipo de planta, el grado de desarrollo, así como de la temperatura e intensidad lumínica ambientales; así como también, que estas concentraciones tienden a reducirse conforme madura la planta. Las concentraciones de los ácidos grasos en los forrajes son importantes en la calidad de los derivados de los rumiantes (carne y leche).

Como en otros nutrientes, en los diferentes tipos de alimentos proporcionados a los rumiantes, se encuentran algunas variaciones dependiendo de la planta y su estado de madurez. En los pastos, se presentan de forma mayoritaria cinco tipos de ácidos grasos poliinsaturados, dentro de los cuales los ácidos linolénico, linoleico y oléico, son los principales sustratos en la degradación ruminal, en la que son hidrogenados por las bacterias y protozoarios, lo que tiene importantes repercusiones en la composición grasa de los diferentes tejidos del rumiante, por lo que es importante que la alimentación de los rumiantes incluya estos nutrientes, ya que son la fuente de ácidos grasos esenciales y de vitaminas liposolubles.

Por su parte, los minerales, aunque también se encuentran en proporciones mínimas en los alimentos, son fundamentales en diferentes procesos orgánicos como la digestión, absorción de nutrientes, hematopoyesis, formación de hormonas y enzimas, crecimiento y fertilidad, por lo que es importante adicionarlos en la alimentación de los rumiantes. Finalmente, aunque las vitaminas se requieren en pequeñas cantidades, juegan un papel importante en diferentes reacciones y funciones fisiológicas del animal. Son las responsables de mantener un buen estado de salud, ya que coadyuvan en la digestión y crecimiento, contribuyen

a fortalecer la resistencia ante enfermedades, son esenciales durante el desarrollo y crecimiento de las crías, así como también ayudan a prevenir la esterilidad en los animales. La aportación de estos micronutrientes en la alimentación no resulta ser tan relevante, ya que las vitaminas del complejo B son sintetizadas por los microorganismos alojados en el rumen.

Así mismo, dentro de la alimentación de los rumiantes el agua es fundamental. Cuando los alimentos están frescos, aportan una buena cantidad del agua que requiere el animal, como los pastos verdes (70-88%), el ensilado (66-85%) y la alfalfa (75%). En menor proporción de esta aportación hídrica, están los granos (11-32%), la paja (10-14%) y el heno (8-17%) (León, Pavón y Carulla, 2011; Pick, 2011; Muñoz y Canto, 2016; Prieto-Manrique *et al.*, 2017; De la Cruz, 2018; González, 2018).

### *La fibra en la alimentación de los rumiantes*

Anteriormente, se consideraba que los contenidos de fibra en los alimentos de los rumiantes, correspondían a la Fibra Cruda o Fibra Bruta (FB). Hoy en día, se sabe que esto no es así, ya que la FB es el residuo orgánico que se obtiene después de que el alimento es tratado con soluciones ácidas (para la remoción de azúcares, almidones, porciones de la pectina y hemicelulosa) y básicas (que remueven la otra porción de pectinas, y partes proporcionales de la hemicelulosa y lignina). En los forrajes, los contenidos de las fracciones fibrosas se expresan como FDN (Fibra Detergente Neutra) y FDA (Fibra Detergente Ácida), que tienden a incrementarse con la maduración de las plantas, haciendo que sean menos digeribles.

La FDN tiene como componentes principales a la celulosa, hemicelulosa y lignina. Su concentración en los alimentos tiene una correlación con la concentración de energía, dependiendo de la composición química de esta fracción fibrosa, es decir, algunos alimentos pueden presentar altos contenidos de FDN y aportar mayor energía para el animal. Lo que se espera es que las cantidades de FDN que sean incluidas en la alimentación, estén en función de las necesidades energéticas de los rumiantes.

En la nutrición de los rumiantes, esta fracción fibrosa se ha relacionado con su actividad masticatoria, la densidad del alimento, el nivel de consumo, la tasa de degradación ruminal y el grado de digestibilidad de la dieta suministrada. Estos aspectos son importantes, sobre todo si se considera que el mantenimiento del rumiante, incluyendo sus funciones vitales y productivas, dependen enteramente del consumo de alimento, lo que a su vez depende del apetito del animal. Si bien éste último puede variar con la edad, o el estado fisiológico del animal, también es determinado por las características del alimento y su digestibilidad, que afectan no sólo el suministro de los nutrientes necesarios, sino la eficiencia alimentaria. A pesar de que en los procesos productivos se busca maximizar el consumo de alimentos y reducir al mínimo las pérdidas energéticas, el grado de digestibilidad de los alimentos, es un factor determinante. En particular, el



consumo de forrajes no sólo depende de las características del alimento que es suministrado o de las capacidades del tracto digestivo del animal; dado que los rumiantes tienen que almacenar por varias horas el alimento para que se realice la fermentación en el rumen, la capacidad física y el potencial consumo se ven limitados, lo que implica que no sólo hay un control metabólico, sino también físico para que el animal ingiera más alimento.

Para determinar la ingesta total de energía por los rumiantes, el factor más importante es el consumo voluntario, regulado por el tipo de alimento, la demanda fisiológica de nutrientes y la capacidad ruminal. Por ejemplo, en rumiantes que reciben alimentos de baja digestibilidad, el tiempo de procesamiento suele ser mayor, por lo que la fatiga fisiológica que implica la digestión del alimento, así como la distensión del rumen pueden traducirse en una disminución del consumo. En una condición como esta, es preciso considerar que no necesariamente la saciedad está acompañada de una idónea aportación de nutrientes, se trata más bien de un control físico que regula el consumo de más alimento. En contraposición, dietas balanceadas que integran además de forrajes, concentrados alimenticios ricos en proteínas pueden ser fácilmente digeribles, tienden a requerir de un menor consumo energético y, por tanto, incrementar el consumo en el animal. En cuanto a la FDA, esta fracción de fibra en los alimentos corresponde a las porciones de pared celular del forraje, cuyos componentes primarios son la celulosa y la lignina, y que son importantes para determinar la capacidad de los rumiantes para digerir el forraje, es decir, la FDA es un indicador del grado de digestibilidad del alimento (Araujo-Febres, 2005; Fernández, 2014).

### **Tipos de alimentos para rumiantes en sistemas extensivos de producción**

Como se señaló anteriormente, los sistemas extensivos de producción combinan las labores de la agricultura con la crianza de animales, lo que permite que los animales se alimenten de los residuos agrícolas generados después de la cosecha, así como de algunas porciones de ésta, lo que representa una ventaja económica para los productores. Así mismo, dentro de la alimentación animal en este tipo de sistemas, se incluyen materiales vegetales que pueden ser utilizados como alimento y que son consumidos por los animales durante el pastoreo. Es por esto, que los forrajes incluyen no sólo los materiales cultivados, sino los que se producen de manera natural integrando una gran cantidad de plantas herbáceas, arbustivas e incluso arbóreas (estratos vegetales), en su mayoría gramíneas y leguminosas, que aportan nutrientes a los animales para su crecimiento y desarrollo.

Los forrajes comprenden a todos aquellos materiales de origen vegetal empleados en la alimentación animal; por lo que, en sentido es-

tricto, los tipos de alimentos naturales que son proporcionados a los animales, son forrajes. Lo que varía, además de su estrato vegetal, es la forma en que son suministrados. Los forrajes frescos, incluyen alimentos que son cortados directamente de los cultivos (alfalfa, hojas y tallos de maíz, elotes), o de plantas no cultivadas que son consumidas de manera directa por los animales, o cortadas para ser proporcionadas a los animales, como es el caso de los pastos. Entre los forrajes naturales o procesados, para su almacenamiento y disponibilidad, se encuentran:

*Heno*: Es un forraje que es deshidratado para poder conservarlo, empleando la deshidratación natural, (una vez segado, el forraje es esparcido en un terreno para exponerlo al sol para su secado), o bien, mediante la aplicación de procedimientos tecnificados cuando están al acceso del productor; a través de la técnica denominada henificación, la cual consiste básicamente en reducir al mínimo la cantidad de agua de los materiales vegetales, con el objetivo de estabilizar y mantener la calidad del material vegetal, cesando toda actividad celular y de microorganismos presentes en las plantas, para evitar la proliferación de hongos filamentosos y bacterias que puedan contaminarlo. En la henificación natural influyen factores como la intensidad de la radiación solar, la temperatura y humedad relativa (HR) del aire, la velocidad del viento, así como la humedad del suelo. En condiciones naturales este proceso, que requiere la mayor exposición de la materia vegetal a la acción del sol, empleando el volteado continuo que garantice que el total de ésta pueda ser expuesta, se puede realizar de forma eficiente a temperaturas superiores a los 15°C y una HR menor al 70%. No obstante, no sólo las condiciones ambientales influyen en este proceso, pues las características propias de las plantas, también son determinantes. Por ejemplo, se ha observado que las leguminosas tardan más tiempo en secarse que las gramíneas, por presentar un mayor contenido de agua y porcentaje de tallos. Una vez realizada la deshidratación (generalmente a niveles por debajo del 20%), el heno puede ser empaquetado en pacas, para ser almacenado en lugares con buena ventilación y protegidos de la acción de la lluvia, donde podrá continuar con su secado. Este proceso puede ser aplicado a pastos, hojas de leguminosas y especialmente a la alfalfa (Ramos y Díaz, 2004).

*Ensilado*: Es el forraje conservado en el que se induce la fermentación aeróbica de los carbohidratos solubles para producir ácido láctico, así como pequeñas proporciones de ácido acético, que hacen que el pH baje a un nivel (entre 4 y 5) que impide la proliferación de microorganismos que producen la putrefacción del alimento, lo que hace posible que los forrajes se almacenen conservando su palatabilidad y calidad. Esta fermentación es producida por bacterias mesófilas que producen ácido láctico. Por lo general, el ensilaje se realiza con cultivos que fueron destinados para tal fin por lo que en la molienda que se realiza en el campo, suelen integrarse los tallos, hojas y frutos (particularmente las mazorcas de maíz). El proceso comprende 4 fases: 1) Aeróbica, que dura unas cuantas horas, en la que después de la siega, disminuye el oxígeno atmosférico contenido en

la masa vegetal por la respiración de estos materiales y de los microorganismos como levaduras y enterobacterias; y se produce una importante actividad enzimática mediada por carbohidrasas y proteasas; 2) Fermentación, es cuando se inicia la producción de un ambiente anaeróbico y puede tener una duración de varios días o semanas, dependiendo del tipo de plantas, y es donde se establece la colonización de las bacterias epifíticas de ácido láctico, reduciendo el pH a valores entre 3.8 y 5.0; 3) Estable: Sucede cuando se mantienen las condiciones libres de aire, por lo que no hay cambios sustantivos en el material vegetal, pero la mayoría de los microorganismos que se reprodujeron de forma activa en la fase previa empiezan a disminuir progresivamente, y, 4) Deterioro aeróbico, que es cuando el ensilaje es abierto y por tanto, el ensilado entra en contacto con el aire, especialmente en las áreas superiores, lo que conlleva a la degradación de los ácidos orgánicos y al aumento del pH, culminando con un aumento progresivo de la temperatura y el deterioro del ensilado por la acción de microorganismos como bacilos, mohos y enterobacterias (Oude *et al.*, 2001; Martínez-Fernández *et al.*, 2014).

*Residuos de cereales:* Los tallos y cascarillas de los cereales (gluma), son forrajes aptos para la alimentación de los rumiantes. Generalmente son recolectados una vez que se ha obtenido el producto de la cosecha. Son ricos en fibra del tipo FND.

*Residuos secos de cultivos:* Incluye a los rastrojos (restos de tallos y raíces que quedan como remanentes en el área de cultivo después de la cosecha), así como los tallos y hojas secas, de siembras destinadas a la producción de granos para el consumo humano, como maíz, sorgo, trigo, avena, cebada o centeno, entre otros, que pueden ser empleados para la alimentación de los rumiantes. Debido a que generalmente son recogidos secos de las áreas de cultivo, lo que debe vigilarse son las condiciones de almacenamiento, de modo que se cuente con este suministro en las épocas de sequía, lo que garantiza que los rumiantes cuenten con el aporte adecuado a lo largo del año.

*Pajas:* Son los tallos secos y delgados de los cereales que quedan después de que el grano es separado de la espiga durante la trilla. Por lo general, pueden ser consumidas de manera directa por los rumiantes durante el pastoreo, o bien, ser empacadas en el campo o transportadas en montículos para su almacenamiento y disponibilidad. Aunque se considera que las pajas de trigo, avena o cebada, cuentan con un bajo valor nutritivo, al constituir poco más del 50% del cultivo representan un recurso valioso al que se puede acceder en las épocas de escasez de forraje, contribuyendo a que los animales se mantengan en buen estado.

*Tallos gruesos:* De las diferentes fuentes de forraje, los más ampliamente utilizados son los tallos del maíz, pueden ser consumidos directamente por los animales en los campos de cultivo después de la cosecha de elotes, en que todavía conservan cierto grado de humedad; aunque generalmente son recolectados y apilados en «mogotes» junto con las mazorcas,

para su secado en condiciones naturales. Su valor alimenticio es mayor que otros forrajes, ya que contienen cerca del 6-9% de proteína cruda e hidratos de carbono solubles, que garantizan una alta ensilabilidad (obtención de ensilado) y aporte energético para el animal, así como un alto grado de digestibilidad. De igual forma, los tallos del sorgo son una buena opción de alimentación para los rumiantes, en particular si inmediatamente después de la cosecha de las espigas para la obtención del grano, son segados y secados (Suttie, 2003; Ruiz y Saavedra, 2017).

*Vegetación nativa:* Incluye a las gramíneas y leguminosas que crecen de manera natural en cada localidad, y que como recursos forrajeros representan la fuente más económica de la que puede disponer el productor para alimentar a los animales. Durante el pastoreo, la predilección de los animales se da por las hierbas que son consumidas casi a saciedad; sin embargo, a pesar del fácil acceso, el principal problema que enfrenta el productor es su disponibilidad a lo largo del año, ya que, durante la época de estiaje su producción tiende a disminuir, lo que implica que se reduce el aporte de nutrientes, así como de proteína para el animal. Dentro de este tipo de forraje, también se incluyen las hojas, yemas foliares y tallos de árboles y arbustos, que ofrecen ventajas nutricionales por sus contenidos de nitrógeno, vitaminas y minerales, por lo que el ramoneo (consumo de hojas, ramas y tallos) suele ser relevante en la alimentación de los pequeños rumiantes. A pesar de que se trata de un recurso sustentable en muchas regiones, en las que existe una gran diversidad de árboles y arbustos, y que por su alto valor nutricional puede contribuir para la alimentación de los animales en especial en la época de sequía, su uso no está tan extendido, asociando esta situación al desconocimiento de las propiedades de estos recursos forrajeros (Ramírez, 2009; Luna *et al.*, 2012).

## **Valor y calidad nutricional de los forrajes en la alimentación de los rumiantes**

Desde el punto de vista zootécnico, la alimentación animal involucra todos los aspectos relacionados con proporcionar a los animales la cantidad de alimentos necesarios para procurar que se desarrollen de manera óptima, lo que contempla la valoración de las necesidades nutricionales de los animales, del contenido de nutrientes en los alimentos, así como de las cantidades o raciones que deben ser suministradas, en donde el valor nutritivo de los alimentos es fundamental para garantizar el bienestar animal.

Los forrajes representan el recurso más económico y ampliamente utilizado en la alimentación de los rumiantes, por lo que es de especial relevancia conocer su valor alimenticio, el cual no sólo depende de su valor nutritivo por la cantidad de macro y micronutrientes que puedan aportar, sino también del grado de aceptabilidad y digestibilidad por parte de los rumiantes.

Este valor nutritivo, integra tanto la disponibilidad de nutrientes proporcionados en la dieta, como la eficiencia de su conversión en los procesos metabólicos y digestivos que se desarrollan en el tracto gastrointestinal del rumiante, mediante la hidrólisis y solubilización de los nutrimentos, para su aprovechamiento. En todo este proceso, la disponibilidad de nutrientes no sólo depende de la cantidad de forraje consumido, sino de la concentración de nutrientes presentes en el alimento, que finalmente pueden ser absorbidos para ser utilizados por el animal, por lo que la calidad del forraje es relevante. Esta calidad nutricional del forraje, está determinada por el grado de madurez de la planta, pues a medida que éste avanza el contenido de proteínas y carbohidratos digeribles tiende a disminuir, mientras que las porciones fibrosas no digeribles aumentan. Esto indica que a medida que avanza el estado fenológico de la planta, su composición química va variando, por lo que la calidad del alimento suministrado a los rumiantes, a pesar de tratarse de la misma especie vegetal, presenta variaciones tanto en la época de cosecha, los periodos de pastoreo a lo largo del año, las especies y tipos de estratos de las plantas, así como de la época del año (Cáceres y González, 2000; IICAT, 2015; Muñoz-González *et al.*, 2016; Caravaca, 2018).

En un estudio realizado durante dos años consecutivos en Veracruz, para determinar el efecto de la estación del año y la carga animal sobre el rendimiento del forraje de pastos nativos, se evaluó la calidad nutritiva de hojas y tallos, durante las épocas de lluvia, viento y sequía, midiendo el contenido de proteína cruda, pared celular, fibra detergente ácida (FDA), fibra detergente neutra (FDN), digestibilidad de la materia seca y el porcentaje de lignina. En términos de eficiencia de utilización, se determinó que para ambos años las hojas (36.8%), tallos (28.9%) y forraje total (26%) no fueron afectados por la carga animal; sin embargo, sí se encontraron diferencias en los componentes del forraje en las épocas del año, ya que en el segundo año la eficiencia de utilización de las hojas fue menor en la época lluviosa (23%) que en la seca (39%), mientras que los tallos (21%) y el forraje total (26%) no fueron afectados.

Del análisis comparativo de los resultados, se observa que hay diferencias entre los dos años evaluados, no sólo por el aumento general de los valores porcentuales en el segundo año para las diferentes variables integradas; sino porque, a excepción del contenido de lignina que para ambos años reporta el mayor porcentaje en las hojas para la época de viento y en los tallos en la de lluvia, para el resto, hay diferencias entre un año y otro. De esta comparación se tiene que el contenido de proteína cruda en las hojas fue mayor en el primer año en la época de viento, en tanto que en el segundo para la de lluvias; en los tallos, en este orden, los mayores porcentajes correspondieron a la época seca/lluvia. Para la FDN y FDA, a excepción de las hojas que para el segundo año el mayor porcentaje se ubica en la época de viento, para el resto de los valores

corresponden a la época de lluvia. En cuanto a la digestibilidad, hay diferencias en ambos años para las hojas, el primero para la época seca y el segundo para la de lluvias, en tanto que en los tallos la mayor digestibilidad se presentó en la época de viento en ambos años. Los datos de esta comparación, se presentan en la Tabla I.

**Tabla I.** Calidad nutritiva de hojas y tallos de forrajes nativos durante las épocas del año en el trópico húmedo mexicano (Veracruz) evaluada en dos años consecutivos

Variable (en %) / ÉPOCA	HOJA			TALLO <sup>(1)</sup>		
	LLUVIA	VIENTO	SECA	LLUVIA	VIENTO	SECA
<b>2005-2006</b>						
Proteína cruda	8.2 <sup>a</sup>	12.2 <sup>a</sup>	10.5 <sup>c</sup>	5.6 <sup>a</sup>	6.8 <sup>ab</sup>	7.1 <sup>b</sup>
Fibra Detergente Neutra (FDN)	70.8 <sup>a</sup>	62.9 <sup>b</sup>	61.8 <sup>b</sup>	77.8 <sup>a</sup>	70.6 <sup>b</sup>	67.9 <sup>b</sup>
Fibra Detergente Ácida (FDA)	43.8 <sup>a</sup>	34.5 <sup>b</sup>	32.1 <sup>c</sup>	44.5 <sup>a</sup>	34.9 <sup>b</sup>	32.3 <sup>b</sup>
Digestibilidad de materia seca	59.4 <sup>a</sup>	67.3 <sup>b</sup>	67.4 <sup>b</sup>	63.0 <sup>a</sup>	68.6 <sup>b</sup>	68.1 <sup>b</sup>
Lignina	9.7 <sup>a</sup>	8.16 <sup>b</sup>	7.2 <sup>b</sup>	9.4 <sup>a</sup>	6.6 <sup>b</sup>	6.3 <sup>b</sup>
<b>2006-2007</b>						
Proteína cruda	15.25 <sup>a</sup>	14.0 <sup>b</sup>	12.4 <sup>c</sup>	9.1 <sup>a</sup>	7.8 <sup>b</sup>	7.1 <sup>c</sup>
Fibra Detergente Neutra (FDN)	66.4 <sup>a</sup>	68.5 <sup>b</sup>	67.9 <sup>b</sup>	69.4 <sup>a</sup>	65.4 <sup>b</sup>	65.6 <sup>b</sup>
Fibra Detergente Ácida (FDA)	31.9 <sup>a</sup>	35.4 <sup>b</sup>	33.3 <sup>c</sup>	34.1 <sup>a</sup>	33.5 <sup>a</sup>	30.2 <sup>b</sup>
Digestibilidad de materia seca	79.1 <sup>a</sup>	73.9 <sup>b</sup>	71.6 <sup>c</sup>	74.8 <sup>a</sup>	76.3 <sup>a</sup>	73.6 <sup>a</sup>
Lignina	7.3 <sup>a</sup>	8.2 <sup>a</sup>	7.0 <sup>a</sup>	5.8 <sup>a</sup>	5.6 <sup>a</sup>	5.3 <sup>a</sup>

**Acotaciones:** <sup>a, b, c</sup>=Medias con diferentes superíndices dentro de la fila por componente de la planta y estación son estadísticamente diferentes (P < 0.05). (1) Tallo = tallo verdadero + vaina de la hoja.

**Fuente:** Adaptado de Jarillo-Rodríguez *et al.*, 2011

Con base en los resultados generados en este estudio, los autores concluyen que más que la carga animal, el factor primordial que influye sobre la calidad nutritiva del forraje, es la época de del año, especialmente la época de lluvia en que se incrementa la producción del forraje, y con ello aumenta el contenido de la pared celular, pero disminuyen tanto el

contenido de proteína cruda como la digestibilidad de la pared celular, por el aumento de las fracciones de fibra no digeribles (Jarrillo-Rodríguez *et al.*, 2011).

Además de la influencia que tienen las épocas del año, el valor nutricional varía entre los diferentes forrajes dependiendo del tipo de planta del que se trate, su estado fisiológico, así como también de la forma en que es suministrada a los rumiantes, ya sea verde, deshidratado (henos, pajas y pacas), o en ensilado. Como regla, se ha observado que entre más avanza el grado de madurez de los forrajes, el contenido proteico se reduce en tanto que el fibroso aumenta, se modifica el valor nutricional por el aporte de energía metabolizable, así como por la reducción de proteínas y minerales digestibles, lo que impacta en la productividad de los rumiantes al consumir alimentos con menores contenidos de nutrientes de calidad (Trujillo y Uriarte, *s/f*; Vargas, 2007).

En la Tabla II, se muestra de forma comparativa la composición química de diferentes forrajes, así como las variaciones que se presentan dependiendo de la forma en que son suministrados a los rumiantes.

**Tabla II.** Composición química de forrajes empleados para la alimentación de rumiantes

FORRAJE	Materia seca (%)	Proteína cruda (%)	E M * (Mcal/Kg)	Fibra (%)	Cal- c i o (%)	Fósforo (%)
<b>VERDE (FRESCO)</b>						
Avena (1° corte)	15	22	2.6	48	0.3	0.4
Avena (último corte)	22	18	2.16	52	0.3	0.4
Trigo	21	23	2.35	52	0.4	0.4
Ryegrass (pasto forrajero) (1° corte)	18	18	2.25	45	0.55	0.35
Raigrás (último corte)	26	15	2.15	52	0.5	0.3
Maíz	23	7	2.3	54	0.25	0.3
Sorgo (1° corte)	18	14	2.15	56	0.35	0.45
Sorgo (último corte)	23	9.5	2.0	62	0.1	0.25
<b>PACAS</b>						
Avena	87.6	12.3	2.11	59	0.2	0.2
Mijo (cereal)	88.9	9.9	2.11	72	0.3	0.1
Alfalfa	88.5	18.8	2.15	56	1.4	0.2
Rastrojo de soya	87.6	5.3	1.49	70	1.4	0.2
Sorgo forrajero	87.5	8.1	1.81	71	0.4	0.4
Trébol rojo	88.9	12.6	2.24	55	1.3	0.2

**Tabla II.** Composición química de forrajes empleados para la alimentación de rumiantes

(Continuación)

<b>PASTURA</b>						
Avena	21	18	2.7	41	0.1	0.05
Alfalfa	24.2	14.5	2.36	45.9	1.2	0.6
Festuca (gramínea)	20.5	14	2.25	48	0.4	0.35
Achicoria (hierba)	21.2	14.4	2.2	44.4	1.2	0.5
Trébol rojo	24	15	2.05	44	1.1	0.3
Pastizal	41.1	11.6	1.39	51.4	0.8	0.4
<b>ENSILADO</b>						
Sorgo forrajero	28.8	8	1.9	65.8	0.3	0.1
Alfalfa	55.6	21.3	2.29	39.2	1.2	0.25
Maíz	20.9	8.1	2.01	64.4	0.3	0.1
Avena	20.40	2.16	0.50	8.12	0.10	0.05
<b>HENO</b>						
Alfalfa	88.5	14.78	2.15	26.20	1.30	0.18
Trébol heno	88.0	13	1.95	25.00	1.49	0.25
<b>PAJA</b>						
Trigo	84	2.7	1.73	43.3	0.43	0.06
Avena	86	2.2	1.62	43.7	0.24	0.16
Cebada	86	3.8	1.93	38.5	0.37	0.11
Lenteja	93	5.4	2.78	49.9	0.07	0.41
Trébol	89.0	2.37	1.26	39.76	0.42	0.02
Trigo	89.2	13.50	2.30	12.0	0.11	0.78

**Acotación:** \*EM= Energía metabolizable**Fuente:** Elaboración propia con base en los datos reportados por FFIA (1992), Fernández (2010) y Ruíz y Saavedra (2017)

Según se observa, cada una de las variables consideradas (materia seca, energía metabolizable y los porcentajes de proteína cruda, fibra, calcio y fósforo), varían entre una especie vegetal y otra, lo que determina que el valor nutricional de los forrajes sea diferente. Para mostrar las variaciones que pueden tenerse en función de las formas en que el forraje es suministrado, en la Tabla III, se retoma de la Tabla II lo correspondiente a la avena y el maíz, como ejemplos.



**Tabla III.** Composición química de avena y maíz en diferentes formas de suministración a los rumiantes

FORRAJE	Materia seca (%)	Proteína cruda (%)	EM* (Mcal/Kg)	Fibra (%)	Calcio (%)	Fósforo (%)
Avena verde (1° corte)	15	22	2.6	48	0.3	0.4
Avena verde (último corte)	22	18	2.16	52	0.3	0.4
Avena (Paca henificada)	87.6	12.3	2.11	59	0.2	0.2
Avena (Ensilado)	20.40	2.16	0.50	8.12	0.10	0.05
Maíz (Verde)	23	7	2.3	54	0.25	0.3
Maíz (Ensilado)	20.9	8.1	2.01	64.4	0.3	0.1

**Acotación:** \*EM= Energía metabolizable

**Fuente:** Elaboración propia con base en los datos reportados por Fernández (2010)

Es lógico suponer que el contenido de materia seca es menor en las plantas verdes, respecto de las formas que han sido desecadas o tratadas mediante algún proceso de conservación como el ensilaje. Si se observa, en el caso de la avena el porcentaje de materia seca aumenta de forma proporcional con la madurez de la planta que, según lo referido con anterioridad, conlleva a la disminución del porcentaje de proteínas y al aumento de fibra. Cuando la avena es sometida a un proceso de secado para reservarla o almacenarla como pacas, el porcentaje de materia seca aumenta y se establece la misma relación con los contenidos de fibra y proteína; mientras que como ensilado la avena no pierde tanta humedad, pero los porcentajes de proteínas y fibra son bajos, debido a la fermentación que se producen en el ensilaje, en la que intervienen enzimas como las proteasas y carbohidrasas. Con base en esto, es posible inferir que el mayor valor nutritivo de la avena además de su estado fresco, es en forma de pacas pues durante el ensilaje, se pierde gran parte de su valor nutricional, por lo que el rumiante es alimentado, pero no nutrido, lo que se ve reflejado en el aporte a la energía metabolizable, que sólo es de 0.50 Mcal/Kg.

El caso del maíz es diferente, (los datos de estas dos especies provienen de la misma fuente), y no es que se trate de datos erróneos, sino que las diferencias se relacionan con la estructura de la planta, con tallos más gruesos y con hojas, que si bien en el estado fresco (verde) aporta menos proteína y energía que la avena, como ensilado aporta más de estos nutrimentos que ésta. Las diferencias entre el maíz verde y el ensilado, deviene de la cuantificación de las porciones de la planta empleadas como forraje; cuando el maíz todavía es parte del cultivo, generalmente lo que se proporciona al animal como alimento son las hojas y tallos sin el elote, en tanto que los cultivos destinados a ensilaje integran tallos, hojas y maíz

al proceso, de ahí el incremento del contenido proteico.

De lo anterior, se desprende que tanto la composición nutrimental como la morfología de las plantas (tallos, hojas, flores, semillas) empleadas como forraje para la alimentación de los rumiantes, determinan tanto su palatabilidad, como su valor y calidad nutricional medidos no sólo en función de la satisfacción de los requerimientos del animal, sino en la forma en que influyen tanto en la ingesta (consumo voluntario), la eficiencia ruminal y la energía disponible para que los rumiantes desarrollen sus procesos metabólicos y productivos.

En el valor y calidad nutricional de los forrajes, el contenido de materia seca es fundamental ya que en ésta se encuentra entre el 45 y 80% de los carbohidratos, a partir de los cuales se obtienen los ácidos grasos volátiles durante la fermentación ruminal y que son la fuente más importante de energía para el rumiante. Incluye tanto a los carbohidratos estructurales (~40-60% de la base seca de los forrajes), que conforman la mayor proporción de la pared celular vegetal en forma de hemicelulosa, celulosa o pectina; y a los carbohidratos no estructurales (~4-20%), que funcionan como sustancias de reserva, como los azúcares simples (glucosa, fructosa o galactosa) y los carbohidratos complejos (almidón), que son aprovechados por los animales en su alimentación (Trujillo y Uriarte, s/f).

Los contenidos de azúcares libres y sustancias de reserva, varían dependiendo del tipo de forraje del que se trate (pasturas naturales, forrajes sembrados, verdeos o cultivos forrajeros), las condiciones edáficas (propiedades del suelo en el que crecen las plantas cuyo contenido de nutrientes puede ser variable), la época del año, hasta las formas de conservación del forraje (paja, heno, ensilado). En cuanto a la proteína cruda, sus contenidos son muy variables lo que tiende a modificar el valor nutritivo de los forrajes en sus diferentes formas de suministro. De acuerdo con los datos de la Tabla II, los porcentajes más altos corresponden al trigo y la avena verde con 23% y 22%, respectivamente, en un nivel intermedio se ubican los henos de achicoria y Festuca (14.4% y 14%), los ensilados de maíz y sorgo forrajero (8.1% y 8.0%) y en las menores proporciones las pajas de cebada (3.8%), trigo (2.7%) y avena (2.2%) (Núñez *et al.*, 2010; Herrero *et al.*, 2015; López-Vigoa *et al.*, 2019).

### **Digestibilidad de los forrajes**

Además de la composición química de los forrajes, una característica que también es determinante en su valor y calidad nutricional, es la digestibilidad, a partir de la cual es posible valorar las proporciones de nutrientes contenidos en el alimento, que son absorbidos en el tracto digestivo del rumiante para llevar a cabo sus procesos metabólicos. Es decir, la digestibilidad involucra a los procesos tanto de digestión, de absorción de nutrientes, como del metabolismo animal, interrelacionados con la calidad del forraje por sus contenidos de materia seca, FDA, FDN y proteína

cruda, por lo que puede ser muy variable dependiendo de la especie del forraje, así como de la forma de manejo o suministro de que se trate (Giraldo, Gutiérrez y Rúa, 2007; Navarro-Ortiz *et al.*, 2018).

En términos de aprovechamiento de la materia vegetal, dentro de los herbívoros, los rumiantes son considerados como los más especializados, por la relación simbiótica que establecen con los microorganismos contenidos en la cámara pregástrica o preestómagos (formados por los compartimentos gástricos rumen, retículo, y omaso), que les permite digerir la mayor parte de las paredes celulares de los forrajes (formados principalmente de hemicelulosa, celulosa y pectina) para aprovechar los nutrientes. Aunque a diferencia del abomaso (cuarto compartimento) o estómago verdadero que tiene una mucosa secretora y que funciona prácticamente como el estómago de los monogástricos, mediante una digestión glandular en la que participan enzimas; los preestómagos no presentan un epitelio secretor, por lo tanto, no contienen enzimas; sin embargo, la mayor parte del proceso digestivo se realiza en estos tres compartimentos, gracias a la fermentación producida por los microorganismos simbióticos.

En el rumen, primer compartimento y de mayor tamaño, es donde se recibe el alimento y es mezclado con la saliva, que contiene enzimas como la lipasa y la amilasa salival que ayudan a la descomposición de los lípidos y el almidón, respectivamente. Contiene cerca de 30 especies diferentes de bacterias anaerobias, que son las responsables de la fermentación ruminal, a través de la cual el alimento es transformado en proteínas y carbohidratos digeribles. Es el responsable de la rumia y de la emisión de la mayor parte del metano que, junto con el producido en el retículo, es expelido al ambiente mediante la eructación.

El siguiente compartimento, el retículo, es la cavidad gástrica más pequeña en la que a través de movimientos musculares, junto con la microbiota reticular, contribuyen con el procesamiento de la fibra vegetal; en esta porción, también se produce metano. Dada su posición anatómica, su función en el proceso digestivo es de doble vía; por un lado, realiza el traslado del alimento fermentado al omaso; y por otro, produce la regurgitación en la que el alimento es devuelto a la boca, pasando por el rumen, para que sea remasticado, es en esta porción donde se realiza la absorción de los ácidos grasos volátiles (AGV) por las papilas ruminales. En el omaso (tercer cámara pregástrica) se efectúa la absorción de los ácidos grasos y el agua. Finalmente, en el abomaso (estómago verdadero) las glándulas presentes en su epitelio secretan pepsina y renina o quimosina (enzimas proteolíticas) que, junto con el ácido clorhídrico, realizan la digestión enzimática y ácida de las proteínas, respectivamente (Relling y Mattioli, 2014; Gutiérrez, 2015).

Debido a la condición simbiótica que se establece principalmente en el rumen y el retículo, los microorganismos alojados en estas porciones gástricas, son responsables de la fermentación de los alimentos para que los nutrientes puedan ser aprovechados por los rumiantes; por lo que en estos compartimentos deben existir las condiciones para que los microor-

ganismos puedan desarrollarse. El rumen representa un medio especialmente adecuado para el crecimiento de la microbiota, al presentar condiciones de anaerobiosis (que es el factor determinante de la simbiosis, ya que la mayoría de los microorganismos son anaerobios estrictos o facultativos), un adecuado aporte de nutrimentos, pH que oscila entre 5.5 y 7.0, una temperatura de 39 a 40°C, así como los mecanismos metabólicos para que los productos de desecho sean eliminados del sistema, condiciones que requieren estos microorganismos para su crecimiento, desarrollo y reproducción.

Los diferentes tipos de microorganismos alojados en el rumen, se encuentran en total interacción, constituyendo un verdadero ecosistema que hace posible que la fermentación ruminal del alimento maximice su eficiencia; además juegan un papel importante en el metabolismo de los rumiantes, por la producción de proteínas, metabolitos y nutrientes microbianos, que son absorbidos y aprovechados por los animales. Las poblaciones microbianas ruminales, integran protozoarios ciliados, arqueas (un dominio filogenéticamente cercano a las bacterias, responsables de la metanogénesis ruminal), hongos del tipo de las levaduras y bacterias, que secretan enzimas para la hidrólisis de los sustratos, por lo que la fermentación pregástrica es de tipo aloenzimática, dado el origen microbiano de las enzimas.

Aunque esta fermentación pregástrica microbiana, resulta ser un proceso más lento que la digestión que se realiza en el estómago verdadero, que es de tipo autoenzimática (las enzimas son secretadas por las glándulas epiteliales del propio animal); resulta en una ventaja que diferencia a los rumiantes del resto de los animales herbívoros, debido a que los sustratos no sólo son transformados en un mayor grado, sino que son digeridos componentes de las plantas que no podrían ser procesados por las enzimas del abomaso (Barahona y Sánchez, 2005; Van Lier y Reguero, 2008).

Los protozoarios ciliados anaeróbicos del rumen, incluyen a poco más de 40 especies que incluyen Holotricos (por ejemplo, *Isotrichia intestinalis* y *Dasytricha ruminantium*) y Espirotricos (*Diplodinium elongatum*, *Polyplastron multivesiculatum* y *Entodinium elongatum*). Participan en la digestión de carbohidratos estructurales como la celulosa y hemicelulosa (aunque de forma menos eficiente que las bacterias ruminales), el mantenimiento del sistema microbiano ruminal por su capacidad de absorber bacterias muertas, y en los procesos de biohidrogenación de los ácidos grasos contenidos en los forrajes, integrando a su biomasa los ácidos grasos de mayor valor nutricional, para la producción de ácido linoleico conjugado, también denominado ácido ruménico, con excelentes efectos biológicos para el rumiante, de los que destaca su efecto antilipogénico de importancia en la producción de leche, relacionado con el contenido de grasa. La mayor relevancia de los protozoarios ruminales se asocia a la síntesis de ácido linoleico conjugado, que tiende a incrementar las proporciones de ácido vaccénico, como precursor de la síntesis endógena, repre-

sentando la fuente principal de ácidos grasos asimilables para el rumiante (Or-Rashid, Odongo & Mc Bride, 2007; Or-Rashid, AlZahal & Mc Bride, 2008; Betancourt, 2019).

Por su parte, los hongos ruminales que pueden estar en la pared del rumen, adheridos a la materia sólida (alimento) o en la fracción líquida del rumen, tienen como función principal participar en el metabolismo de los ácidos grasos insaturados, siguiendo el mismo proceso de biohidrogenación del ácido linoleico para la producción de ácido vaccénico; sin embargo, se ha observado que realizan este proceso de forma más lenta y menos eficiente que las bacterias y protozoarios, por lo que se consideran como no esenciales en el rumen. De hecho, de los tres grupos de microorganismos, los más eficientes en el proceso de biohidrogenación de los ácidos grasos, son los protozoarios; en tanto que las bacterias juegan un papel relevante en la degradación de las proteínas, y especialmente de los carbohidratos contenidos en los forrajes, gracias a la diversidad y especificidad enzimática que presentan (Devillard *et al.*, 2006; Nam y Garnsworthy, 2006; Sultana *et al.*, 2011).

Esta especificidad enzimática de las bacterias ruminales, se asocia al tipo de sustrato que fermentan de forma predominante, el cual además es determinante para el desarrollo de las poblaciones bacterianas. Así, hay bacterias amilolíticas, como *Bacteroides ruminicola*, *Succinomonas amylophilica* y *Bacteroides amylophilus*, que degradan el almidón y cuyas poblaciones son reducidas en los forrajes proporcionados a los rumiantes en los sistemas extensivos, pero son muy abundantes en la flora bacteriana de rumiantes de sistemas intensivos, en los que las raciones incorporan granos de cereales. A partir de esta especificidad por el sustrato, entre otras, se encuentran las bacterias proteolíticas (rompen los enlaces peptídicos de las proteínas para liberar aminoácidos y péptidos); lipolíticas (a través de la acción de enzimas estererasas hidrolizan a los fosfolípidos, ésteres y triglicéridos contenidos en los alimentos) o bacterias sintetizadoras de vitaminas del complejo B, como *Selenomonas ruminantium*.

De los diferentes tipos de bacterias que participan en la fermentación ruminal y particularmente, en la digestibilidad de los forrajes suministrados a rumiantes en sistemas productivos extensivos, destacan:

1. Bacterias Celulolíticas: Este tipo de bacterias se encuentra en grandes proporciones en el rumen de animales que son alimentados con forrajes ricos en fibra. Producen celulasa, una enzima que hidroliza los enlaces  $\beta$  de la celulosa, para producir celobiosa; que en algunos casos puede ser empleado por estas u otras bacterias para la producción de glucosa. Ejemplos de estas bacterias ruminales, son *Bacteroides succinogenes*, *Cillobacterium cellulosolvens* y *Ruminococcus albus*.
2. Bacterias Hemicelulolíticas: Producen enzimas que degradan el xilano, principal componente hemicelulósico de las paredes celulares de las plantas (30-35% del peso seco total). Las xilanasas o hemicelulasas, hidrolizan los enlaces glucosídicos y éster, para degradar la

hemicelulosa contenida en los forrajes, liberando los ácidos urónicos (que se generan por la descomposición de purinas), las hexosas y pentosas, para producir glucosa o fructuosa. Ejemplos: *Bacteroides ruminicola*, *Lachnospira multiparus* y *Butyrivibrio fibrisolvens*.

3. Bacterias que emplean como sustrato los azúcares solubles que son generados por la degradación de los carbohidratos estructurales celulosa y hemicelulosa. Estas bacterias son muy importantes porque el producto de la degradación son ácidos grasos volátiles, como acético, butírico y propiónico que son los que se producen en mayor cantidad en la fermentación ruminal, y los ácidos caprílico y caproico, presentes en menores proporciones. En esencia, estos ácidos grasos volátiles son los productos de desecho del metabolismo microbiano; pero para los rumiantes, representan el sustrato energético más importante (Barahona y Sánchez, 2005; Zavaleta, 2009; Cooper, 2013).

Con base en las funciones que desarrollan estos microorganismos, así como los subproductos que generan, es posible entender las ventajas que tienen los rumiantes para aprovechar la mayor parte de los componentes de las plantas; en especial, los contenidos de proteínas y carbohidratos de almacenamiento de azúcares como el almidón, o los estructurales como la celulosa y hemicelulosa, que corresponden a la porción fibrosa de los forrajes, que son una importante fuente de energía de la que pueden disponer, gracias a la fermentación microbiana ruminal. Sin embargo, como se ha señalado, dependiendo del tipo de forraje de que se trate, los contenidos de fibra tienden a ser altos y variables, los que se incrementan a medida que progresa el estado de maduración o envejecimiento del forraje, reduciendo aún más su digestibilidad (ración de alimento que desaparece por la acción de los microorganismos ruminales y que permite estimar la cantidad de nutrientes contenidos en el alimento).

Aunque el contenido de fibra extraída en detergente neutro o FDN, en los recursos forrajeros puede representar del 30-80% de la materia orgánica, su digestibilidad es total; no obstante, su degradabilidad (proporción de alimento que es descompuesto a sus elementos constitutivos por procesos químicos o biológicos), es muy variable ya que depende de la estructura y composición del forraje. Esta relación digestibilidad/degradabilidad indica que todo el alimento que puede ser descompuesto durante la fermentación ruminal es aprovechado (digestibilidad), pero no todo el alimento que es consumido es descompuesto y por tanto, la mayor parte es degradado o desaprovechado (degradabilidad), lo que hace que la energía disponible tienda a ser reducida, en particular porque aproximadamente del 50-55% transita por el tracto digestivo sin ser degradada, por la asociación de la hemicelulosa y la celulosa, con la lignina en la pared celular (Barahona y Sánchez, 2005; Vargas, 2016).

Esta condición también es determinante para el consumo voluntario por parte del rumiante, que se ve influenciado por factores como el nivel de llenado gastrointestinal, la estructura química del forraje dependiendo del

tipo de planta de que se trate, su grado de humedad, la facilidad con la que la microbiota ruminal puede degradar el contenido de fibra y el tamaño de las partículas que determinan la velocidad de degradación, principalmente. Visto de esta forma, el rumiante no puede consumir más alimento del que puede procesar (por ello toma tiempos para la rumia), la velocidad con la que realiza la digestión, que depende del tipo de planta y desarrollo fisiológico, ya que se digiere más rápido un forraje verde que uno maduro que fue procesado cuando las plantas alcanzaron su nivel máximo de madurez y los contenidos de lignina son elevados, entre otros aspectos; lo que afecta tanto la eficiencia como la eficacia del proceso, en particular si se contempla que el potencial de los forrajes está determinado tanto por el consumo voluntario, como por el grado de digestibilidad de los forrajes.

Es importante considerar que aun cuando la fibra vegetal permaneciera por largo tiempo en el rumen o fuera continuamente regurgitada y reprocesada, de igual forma, no toda sería digerible en el rumen. Esto se debe a que la lignina tiende a limitar la digestibilidad del forraje, reduciendo el acceso de las enzimas microbianas a la celulosa, hemicelulosa, y proteínas ligadas a estos polisacáridos; por lo que se establece una relación directa entre el grado de lignificación de la pared celular de los forrajes con su grado de digestibilidad y degradabilidad. Dependiendo del grado de madurez, se estima que los rumiantes pueden digerir una mayor proporción de FDN de las leguminosas (40-50%) que de las gramíneas (60-70%), obteniendo un aporte energético del 20-40% y 50-80%, respectivamente. En la Tabla IV, se presenta una comparación de los contenidos de materia seca, tipos de fibra asociada a carbohidratos, lignina y energía metabolizable para diferentes tipos de gramíneas y leguminosas.

**Tabla IV.** Contenidos porcentuales de materia seca, fibra, lignina y energía metabolizable en diferentes tipos de forraje

FORRAJE	TIPO	RMET C3/C4	MS (%)	FDN (%)	FDA (%)	Lignina (%)	EM (Mcal/ Kg)
Alfalfa verde ( <i>Medicago sativa</i> )	LEGUMINOSA	C3	21.4	33.1	23.9	5.4	3.16
Pasto llorón ( <i>Eragrostis curcula</i> )	GRAMÍNEA	C3	20.1	45.8	25.0	2.1	3.17
Heno de pasto llorón ( <i>Eragrostis curcula</i> )	GRAMÍNEA	C3	88.1	64.4	39.5	6.4	2.49
Bermuda ( <i>Cynodon dactylon</i> )	GRAMÍNEA	C4	31.3	66.7	36.7	4.7	±2.0
Heno de bermuda ( <i>Cynodon dactylon</i> )	GRAMÍNEA	C4	87.1	73.3	36.8	6.5	2.36
Kikuyo ( <i>Pennisetum clandestinum</i> )	GRAMÍNEA	C4	20.1	65.3	35.1	4.3	±2.5

Heno de kikuyo ( <i>Pennisetum clandestinum</i> )	GRAMÍNEA	C4	83.0	70.4	41.1	5.6	2.0
Pasto de Marandú ( <i>Brachiaria brizantha</i> )	GRAMÍNEA	C4	29.6	66.8	39.4	5.6	±2.5
Heno de <i>Brachiaria brizantha</i>	GRAMÍNEA	C4	83.8	70.3	45.1	7.0	±2.5
Rye grass perenne ( <i>Lolium perenne</i> )	GRAMÍNEA	C3	22.0	48.9	23.9	3.0	±3.0
Ensilado de Rye grass ( <i>Lolium perenne</i> )	GRAMÍNEA	C3	29.7	57.8	34.9	4.5	2.8
Trébol blanco ( <i>Trifolium repens</i> )	LEGUMINOSA	C3	16.8	27.5	22.1	3.9	±2.5
Trébol rojo ( <i>Trifolium pratense</i> )	LEGUMINOSA	C3	19.7	36.4	26.6	4.1	±2.5
Kudzu ( <i>Pueraria phaseoloides</i> )	LEGUMINOSA	C3	19.3	49.4	38.2	7.1	±2.0
Ensilado de maíz ( <i>Zea mays</i> )	GRAMÍNEA	C4	35.1	45.0	28.1	2.6	2.99
Bagazo fresco de caña de azúcar ( <i>Saccharum spp</i> )	GRAMÍNEA	C4	46.0	86.9	58.4	12.5	1.8

**Acotaciones:** RMET= Vía fotosintética; MS= Materia seca; FDN= Fibra Detergente Neutra; FDA= Fibra Detergente Ácida; EM= Energía metabolizable.

**Fuente:** Adaptado de Francesa (2017) y complementado con la ruta metabólica tomada de diferentes fuentes, así como de la descripción de las especies proporcionada por la CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) en <http://conabio.gob.mx/malezasdemexico>

Según se muestra, para cada tipo de forraje hay diferencias en los contenidos de fibra (FDN o FDA), lignina, así como de energía metabolizable; de igual forma, se observa que no todas las gramíneas son C3 o C4. Este aspecto es relevante ya que las diferencias en el tipo de plantas empleadas como forraje, no sólo se asocian con su estructura, sino también con la ruta metabólica que siguen durante la fotosíntesis para formar azúcares a partir de CO<sub>2</sub>, de lo cual depende el tipo de compuestos orgánicos que están presentes en la planta. Para entender la relevancia de esta diferenciación en los forrajes, en las plantas con una ruta metabólica C3 la pared celular es muy reducida (menos lignina), tienen un alto contenido celular, por lo que su valor nutritivo es mayor y presentan mayor grado de digestibilidad, pero son menos resistentes a las condiciones ambientales. En cambio, en las plantas C4 la pared celular está muy desarrollada lo que implica que el contenido de lignina es mayor, disminuyendo el contenido celular y por consecuencia, son menos nutritivas a la vez de ser menos digeribles, aunque son más resistentes (INTAGRI, 2018).

Así, mientras la lignina juega un papel fundamental en las plantas como soporte estructural, mecanismo de defensa contra heladas, plagas y



de resistencia a muchas enfermedades, en los forrajes para rumiantes representa una condicionante de su valor nutricional, así como una limitante para maximizar la utilización de los nutrientes, ya que determina el grado de digestibilidad de los forrajes. Esto se debe a que la lignina es un polímero integrado por diferentes sustancias fenólicas, que le confieren características hidrófobas, impidiendo que las enzimas bacterianas ruminales puedan digerirla por encontrarse en un medio acuoso, pero especialmente porque la lignina para poder ser digerida requiere de oxígeno, y el ambiente ruminal y los microorganismos que lo habitan, son fundamentalmente anaerobios, lo que genera un impacto negativo en la digestibilidad (Bach y Calsamiglia, 2006; Araiza-Rosales *et al.*, 2013).

En general, han sido identificados tres mecanismos a través de los cuales el grado de lignificación de los forrajes puede limitar la actividad enzimática ruminal sobre los polisacáridos constitutivos de la pared celular: 1) La lignina puede tener un grado de toxicidad que afecta el funcionamiento normal de los microorganismos ruminales, 2) que la estructura molecular de los enlaces lignina-polisacáridos pueden estar limitando el mecanismo de acción de las enzimas sobre carbohidratos específicos (impedimento estérico) y 3) el establecimiento de un medio hidrofóbico generado por la lignina, que impide la cinética enzimática microbiana ruminal, que requiere de un ambiente hidrofílico (Jung *et al.*, 1993 [citados por] Ramírez, Ramírez y López, 2002).

Independientemente del mecanismo que esté impidiendo la digestión de la lignina, lo cierto es que los niveles de este compuesto en los forrajes tienden a disminuir su calidad, ya que además de reducir la disponibilidad nutricional de la FDN y de otros nutrientes celulares como la proteína bruta, provoca el tránsito lento entre el rumen y el retículo de la porción del alimento que no es digerida, manteniendo lleno el rumen, lo que reduce la ingesta de alimento, implicando una menor concentración de energía disponible para el rumiante. En términos energéticos esto es muy importante, ya que los rumiantes requieren del suministro de alimentos que les aporten la suficiente energía metabolizable, que corresponde a la energía contenida en los alimentos, que es aproximadamente del 87%, ya que el resto se pierde en la emisión de metano (8%) y la excreción de heces y orina (5%); a partir de la cual el animal dispone de la energía neta, que es la que realmente está puesta a disposición para que el animal pueda realizar el mantenimiento del equilibrio energético (Energía Neta de Mantenimiento), como su crecimiento (Energía Neta de Crecimiento) (Basurto *et al.*, 2012; Francesa, 2017; Valderrama, 2019).

En la Tabla V, se presenta de forma comparativa las aportaciones de proteínas, fibra asociada a carbohidratos (FDN y FDA), porcentaje de Lignina Ácido Detergente (LAD), así como las aportaciones en energía metabolizable (EM), energía neta de mantenimiento (ENM) y energía neta de crecimiento (ENC) de diferentes tipos de forrajes.

**Tabla V.** Contenidos porcentuales de proteína, fibra y lignina y aportación energética de forrajes empleados en la alimentación de rumiantes

FORRAJE	PB	FDN (%)	FDA (%)	LAD (%)	EM (Kcal/kg)	ENM (Kcal/kg)	ENC (Kcal/kg)
Avena	9.9	30.9	14.2	2.6	2,490	1,700	1,120
Maíz	7.3	9.0	2.8	0.7	2,840	1,965	1,365
Sorgo	8.9	8.8	4.5	0.8	2,770	1,915	1,320
Trigo	13.8	11.9	3.9	1.3	2,800	1,930	1,320
Alfalfa henificada	15.0	42.6	31.5	8.2	1,925	1,290	795
Paja de cereales	4.6	71.1	45.7	8.4	1,260	835	470

**Acotaciones:** PB= Proteína Bruta; FDN= Fibra Detergente Neutra; FDA= Fibra Detergente Ácida; LAD= Lignina Ácido Detergente; EM= Energía metabolizable; ENM= Energía Neta de Mantenimiento; ENC= Energía Neta de Crecimiento

**Fuente:** Elaboración propia con base en los datos registrados en las Tablas FEDNA, versión 15.01.2021 (de Blas *et al.*, 2019)

Desde hace años, diversas investigaciones han demostrado que el grado de lignificación de los forrajes es el principal factor que afecta su digestibilidad: Hatfield (1993), realizó un estudio en el que demostró que la degradación de la pared celular, está determinada por las interacciones covalentes que se establecen entre los polisacáridos, proteínas, lectinas y ácidos hidroxicinámicos con la lignina. Por su parte, Merchen & Bouquin (1994), partiendo de la premisa de que el objetivo principal de la investigación realizada sobre el tema de la digestibilidad de la pared celular por parte de los rumiantes, era identificar los factores estructurales de la planta que limitan el grado de degradación de la pared celular por parte de los microorganismos ruminales, encontraron que el contenido de lignina de los forrajes era determinante en este proceso. Chang & Holstzapfle (2000), refieren la necesidad de realizar pretratamientos para mejorar la digestibilidad de la biomasa, encontrando que el contenido de lignina es la que genera un mayor impacto al respecto. Ramírez, Ramírez y López (2005), refieren que la reducción en la degradabilidad de la materia seca y la baja digestibilidad tanto *in vitro* como *in situ*, está correlacionada con el impedimento estérico de la lignina.

Ante el reconocimiento del efecto que tiene la lignina en la digestibilidad y degradabilidad de los forrajes, en los últimos años se han instrumentado diversas técnicas para su pretratamiento, incluyendo desde procesos físicos como la hidrotérmólisis y trituración; fisicoquímicos a través de la explosión de vapor o de fibras de amonio; y químicos que incluyen el pretratamiento alcalino empleando hidróxido de sodio (NaOH), el pretratamiento ácido, en el que se utilizan ácidos como el sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), nítrico (HNO<sub>3</sub>) o clorhídrico (HCl) y el pretratamiento oxidativo en el que se adiciona peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) para la remoción de la lignina, que si bien han demostrado reducir de forma significativa las proporciones de este compuesto, en algunos casos también se ha identificado que se redu-

ce el valor nutrimental de los forrajes (Basurto *et al.*, 2012; Mateus *et al.*, 2012; Niño, Acosta y Gelves, 2013).

### **Papel de los hongos de pudrición blanca en la deslignificación de los forrajes**

La acción degradadora de los hongos de la madera y otros materiales lignocelulósicos, ha sido distinguida por los efectos y/o coloración de los productos de descomposición, en tres grandes grupos: a) *Hongos de pudrición o podredumbre blanda*, integra a hongos ascomicetos y deuteromicetos que degradan la quitina de árboles frondosos o de los tallos de las plantas herbáceas, reblandeciéndolos principalmente por la proliferación del hongo asociado a altas concentraciones de humedad en el medio; b) *Hongos de pudrición parda*, incluye a algunos basidiomicetos que hidrolizan la celulosa y hemicelulosa, provocando que la lignina que se encuentra en las paredes celulares se acumule, generando un producto de color pardo; y c) *Hongos de pudrición blanca*, incluye a cerca de 7,500 especies (el 30% de todos los basidiomicetos) y algunos ascomicetos, algunos de los cuales degradan principalmente la lignina (por lo que son denominados ligninolíticos), pero de forma secundaria hemicelulosa y en menores proporciones la celulosa (como *Phanerochaete chrysosporium*); y otros que tienen una mayor afinidad sólo por la lignina (como *Pleurotus* spp y *Ganoderma lucidum*). En ambos casos, con la degradación provocan que la hemicelulosa y celulosa no degradadas se acumulen, generando un producto blanco (Télez *et al.*, 2009; Papinutti, 2011; Quintero, 2011; Carabajo, 2015).

Los hongos de pudrición blanca desde hace años, han recibido mucha atención por sus valiosos sistemas enzimáticos, capaces de degradar y mineralizar eficazmente las biomásas lignocelulósicas de desechos agrícolas o forestales que por su abundancia y diversidad representan alternativas de materia prima de bajo costo en la naturaleza, al tratarse de recursos renovables generados en abundancia, pero escasamente utilizados (Buswell *et al.*, 1996; Manavalan, Manavalan & Heese, 2015). A diferencia de los procesos desarrollados a escala industrial, basados en métodos fisicoquímicos que buscan desbloquear el potencial energético de la lignocelulosa para múltiples aplicaciones (en este caso, para aumentar la accesibilidad enzimática de los carbohidratos estructurales y mejorar la degradabilidad de los forrajes por parte de los rumiantes), que además de las altas inversiones para cubrir los costes de los procesos, materiales, equipos, productos químicos y energía, tienden a generar un impacto adverso en el medio ambiente; la deslignificación de los forrajes mediante la utilización de los hongos de pudrición blanca, tiene la ventaja de ser un proceso ecológico que además de contribuir a reducir la contaminación producida por la generación continua de residuos, ofrece la posibilidad de un pretratamiento biológico, como alternativa más sostenible para degradar la lignina de forma selectiva para producir CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (los hongos de pudrición blanca son los únicos organismos con esta capacidad), sin

modificar y/o degradar en gran proporción la celulosa y hemicelulosa, además de ser accesibles para los pequeños productores agropecuarios, contribuyendo en la generación de recursos alimenticios familiares, así como para mejorar la alimentación de sus animales, lo que resulta en un valor agregado (Díaz-Godínez y Sánchez, 2002; Ortega *et al.*, 2005; Zhao *et al.*, 2015; van Erven *et al.*, 2019).

Los hongos de pudrición blanca son los degradadores de lignina más eficientes que se conocen, lo que resulta de gran relevancia para el tratamiento de los forrajes con los que se alimenta a los rumiantes que, ante la imposibilidad de digerirla, a pesar de la alta especialidad de los microorganismos alojados en el rumen, grandes proporciones del alimento son desechadas. La deslignificación que producen los hongos, además de evitar que el forraje se desperdicie, aumenta su calidad y valor nutricional, así como su digestibilidad. Una de las grandes ventajas de los hongos ligninolíticos, es que pueden crecer en una gran diversidad de sustratos, como las pajas (avena, arroz, canola, trigo, sorgo, ebo, zacate), rastrojos (mijo, maíz, frijol), bagazos (uva, caña de azúcar, piña, maguey), desechos agrícolas (esquilmos, cascarillas, tallos y hojas), forestales (ramas, troncos, hojas de piña, aserrín, viruta), residuos agroindustriales y muchos otros, lo que posibilita su cultivo prácticamente en cualquier área agrícola o rural; aunado a los que crecen de forma natural (hongos repisa), descomponiendo los troncos de los árboles (Fazaeli *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2015; Olivera de la Cruz *et al.*, 2019).

En los forrajes, la degradación y/o modificación de la lignina por la acción de los hongos ligninolíticos, es el paso clave en la descomposición; los hongos basidiomicetos de la pudrición blanca, juegan un papel fundamental por ser los únicos organismos capaces de degradar todos los polímeros presentes en la lignocelulosa, incluidas las moléculas de lignina de alto peso molecular, por las conversiones enzimáticas altamente eficientes que realizan. El pretratamiento de los forrajes es un proceso crucial en la conversión de la biomasa lignocelulósica en azúcares fermentables, que facilita su descomposición por parte de los microorganismos ruminales y, por lo tanto, representan potencialmente una tecnología de pretratamiento ecológica y energéticamente eficiente, que ofrece la ventaja de proporcionar forrajes fácilmente digeribles por los rumiantes, a la vez de reducir la cantidad de desechos que son eliminados por otras vías, como la quema en los campos de cultivo, procurando un mejor aprovechamiento y de bajo costo, lo que representa además un proceso más conservador del medio ambiente (Fazaeli *et al.*, 2004; Wan & Li, 2012; Martínez *et al.*, 2005; Kowalczyk *et al.*, 2019).

Esta descomposición es posible, gracias a la conversión enzimática que realizan los hongos sobre los complejos lignocelulósicos, formados de una matriz de celulosa y lignina que se encuentran entrelazados por cadenas de hemicelulosa, lo que confiere una gran resistencia a los forrajes para que los microorganismos ruminales puedan digerirlos. La acción de

los hongos consiste en producir por la vía enzimática la separación de las pentosas sin que se degraden, evitando la generación de compuestos que inhiban la fermentación ruminal (como sucede con la explosión de vapor y otros métodos químicos), sin requerir que el tamaño de las partículas se reduzca de forma drástica (Pineda-Insuasti *et al.*, 2014). Esta acción es posible gracias al potencial de enzimas lignocelulolíticas derivadas de hongos de pudrición blanca, que incluyen a las enzimas lignilíticas como la Lignino-peroxidasa (LiP), Manganese-peroxidasa (MnP), Lacasas (Lac) que contienen cobre y más recientemente, la Peroxidasa Versátil (PV); así como a las enzimas celulolíticas (endoglucanasas, celobiohidrolasas,  $\beta$ -glucosidasas y xilanasas) (Lang, Gonser & Zadrazil, 2000; Litthauer *et al.*, 2007; Manavalan, Manavalan & Heese, 2015; Agostinho *et al.*, 2021a).

Se ha identificado que cada una de estas enzimas, presenta reacciones específicas que contribuyen con la degradación de la lignina. La LiP degrada unidades de lignina no fenólicas (hasta el 90% del polímero); la MnP genera el ion Manganese III ( $Mn^{3+}$ ), que actúa como un oxidante difusible en unidades de lignina fenólicas o no fenólicas a través de reacciones de peroxidación; las VP (identificadas principalmente en *Pleurotus* spp), combina las propiedades catalíticas de LiP, MnP y Lacasas para oxidar compuestos fenólicos; en tanto que las lacasas desempeñan una variedad de funciones en las que además de la degradación de la lignina, participan en la eliminación de los fenoles tóxicos que se producen durante esta degradación, así como también cuentan con capacidad para oxidar sustratos de alto potencial redox, lo que ha incentivado la investigación sobre sus aplicaciones biotecnológicas (Martínez *et al.*, 2005; Tirado-González, 2016; Montoya, Sánchez y Levin, 2014; Kaur, Kocher & Taggar, 2019; Cruz-Vázquez *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022).

Los estudios realizados en torno a los hongos de pudrición blanca, muestran que no todas las enzimas están presentes en las distintas especies, lo que determina las diferencias en los grados de deslignificación que producen; así mismo, esta diversidad se refleja en la variación cualitativa de los principales determinantes enzimáticos (celulasa, xilanasas, ligninasa, etc.), necesarios para la bioconversión del sustrato. Por ejemplo, *Phanerochaete chrysosporium*, solo produce dos enzimas extracelulares (MnP y LiP) responsables de la degradación de lignina en los sustratos. Se ha identificado que el hongo más versátil por contener íntegro el complejo enzimático es *Pleurotus* spp (Pothiraj, Kanmani & Balaji, 2006; Hammel & Cullen, 2008; Xie *et al.*, 2016).

Diferentes investigaciones, han contribuido al conocimiento de las propiedades ligninolíticas de diferentes especies de hongos. Entre otras, se ha encontrado que los complejos multienzimáticos de *P. ostreatus*, *Pleurotus eryngii*, *Trametes versicolor*, *Pycnosporus sanguineus* y *Phanerochaete chrysosporium*, tienen mejores tasas de hidrólisis de la lignina, en comparación con la enzima comercial purificada (Cardoso *et al.*, 2018). Ahora, Chander & Gill (2002), al estudiar hongos de pudrición blanca para evaluar su potencial para degradar la paja de trigo con referencia específi-

ca a su capacidad ligninolítica y enzimas asociadas (LiP, MnP) y Lac, determinaron que *P. chrysosporium*, *Phlebia radiata* y *P. floridensis* fueron los mejores productores de manganeso peroxidasa y lacasa, respectivamente, mientras que *P. chrysosporium* fue mejor para la lignina peroxidasa. Por su parte, Valáskova & Baldrian (2006), en un estudio realizado mediante fermentación en estado sólido en paja de trigo, con los hongos *Pleurotus ostreatus* y *Trametes versicolor* y *Piptoporus betulinus*, para determinar la actividad libre y sólida unida a fracciones de enzimas degradadoras de lignocelulosa, encontraron que la mayoría de las enzimas ligninolíticas lacasa y MnP, se detectan en la fracción libre de los hongos, en tanto que las enzimas unidas representaron el 66% de la actividad total en cultivos de paja de *P. ostreatus*, el 35% en *T. versicolor* y solo el 8% en *P. betulinus*.

Investigaciones como éstas, han permitido determinar que los patrones de degradación y otras características de los hongos de la pudrición blanca, pueden variar de especie a especie. Entre estos, se ha observado que, aunque en términos generales las enzimas ligninolíticas producidas por los hongos de la pudrición blanca al oxidar el polímero de lignina generan radicales aromáticos, la estructura y concentración de los compuestos aromáticos juegan un papel importante en la regulación de la síntesis de enzimas, debido a que el mismo compuesto aromático puede funcionar como inductor o como represor, según el hongo y la enzima estudiada (Elisashvili *et al.*, 2010). De igual forma, se ha encontrado que el sustrato empleado en el cultivo, puede ser determinante para la activación enzimática.

En un estudio realizado con *Lentinula edodes*, *Volvariella volvacea* y *Pleurotus sajor-caju*, tres hongos cultivados de importancia comercial, que exhiben capacidades para utilizar diferentes sustratos lignocelulósicos, mostraron diferencias en los perfiles enzimáticos lignocelulolíticos como resultado de las variaciones cualitativas en los determinantes enzimáticos (celulasas, ligninasas) necesarios para la bioconversión del sustrato. En el caso de *L. edodes*, que se cultiva en sustratos altamente lignificados como la madera o aserrín, produce dos enzimas extracelulares que se han asociado con la despolimerización de lignina en otros hongos (MnP y lacasa). Por el contrario, *V. volvacea*, que prefiere sustratos altos en celulosa y bajos en lignina, produce una familia de enzimas celulolíticas que incluye al menos cinco endoglucanasas, cinco celobiohidrolasas y dos  $\beta$ -glucosidasas, pero ninguna de las enzimas degradadoras de lignina reconocidas, lo que determina el tipo de sustratos que pueden emplearse (Buswell *et al.*, 1996).

De igual forma, se han encontrado diferencias cuando los hongos son cultivados de forma axénica (un solo tipo de hongo en el cultivo) o de forma asociada en consorcios, en los que diferentes especies se cultivan en el mismo sustrato, para tratar de establecer sinergias que suplan las deficiencias entre unos y otros, y mejorar la calidad de la degradación de la lignina. Estas condiciones, han sido consideradas como determinantes ya que de ello depende la calidad del forraje que se obtenga en términos de digestibilidad, contenido de materia seca, ácidos grasos volátiles, los niveles de producción de metano y su efecto para mejorar la fermentabilidad ruminal.

En un estudio comparativo para evaluar estas variables, se compararon cultivos axénicos de *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium*, con su co-cultivo en la deslignificación de la paja de arroz. Se encon-

tró que la paja de arroz tratada con co-cultivo tuvo un contenido de lignina más bajo (5,3 %) en comparación con *P. chrysosporium* (6,2 %), siendo *P. ostreatus* el que registró la menor fracción de lignina (3,3 %). El tratamiento de la paja de arroz con co-cultivo mejoró la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (68,1 %), los ácidos grasos volátiles totales (35,3 mM) y el gas total (57,4 ml/200 mg) en comparación con *P. chrysosporium* (45,1 %, 32,2 mM, 44,4 ml/200 mg), pero el más eficiente fue *P. ostreatus* (75,3 %, 38,3 mM, 65,6 ml/200 mg). Con base en estos resultados se concluyó que en lugar de un efecto sinérgico del co-cultivo, se observó más bien un efecto antagónico competitivo (Datsomor, Zhao & Miao, 2022).

Sin embargo, los mismos autores plantean que algunas especies pueden formar interacciones sinérgicas por acción enzimática, mejorando significativamente la degradación de materiales lignocelulósicos, lo que puede resultar en una deslignificación comparativamente mayor del material de paja, en un índice de fermentación *in vitro* mejorado en comparación con los monocultivos, lo cual depende enteramente del sustrato que sea seleccionado y de las especies de hongos con los que se establezca el co-cultivo, como ha sido demostrado en otras investigaciones. Al respecto, en un estudio previo en el que se estableció un consorcio de *Phanerochaete chrysosporium*, *Lentinus edodes* y *Pleurotus ostreatus*, empleando como sustrato mazorcas de maíz, se encontró una deslignificación del 96,88% con una degradación de celulosa de 17,70%, después de una incubación de 30 días. Con base en los resultados, se señaló que los microorganismos en un consorcio trabajan sinérgicamente, potenciando un mejor crecimiento, eficientes procesos biológicos y actividades enzimáticas que ayudan a acelerar el proceso de deslignificación, más que en los cultivos hechos en un base individual (Mayhati *et al.*, 2013).

Por su parte, Kaur, Kocker & Taggar (2019) a partir de la evaluación del consorcio fúngico (sin comparativos axénicos) de *Pleurotus ostreatus* y *Phanerochaete chrysosporium* establecido en paja de arroz, determinaron que se produjeron las actividades máximas de Lac, LIP y MnP, una disminución significativa en el contenido de hemicelulosa y lignina, así como también un aumento en la proporción relativa de celulosa, en las que se optimizó estadísticamente la producción de enzimas para humedad (121,1 %), temperatura (31,3° C) y registro de recuento de esporas (8,0 esporas/mL), con una deslignificación máxima del 80,9 %. A partir de los resultados, los autores llegaron a la conclusión de que los consorcios de hongos tienen el suficiente potencial para la deslignificación de la paja de arroz y biomasa lignocelulósica similar; ya que el uso de enzimas fúngicas de un consorcio, representa la concentración óptima de enzimas ligninolíticas, además de ser un proceso respetuoso con el medio ambiente para la deslignificación fúngica.

De esta forma, la deslignificación de los forrajes involucra al sustrato empleado, las condiciones del cultivo, la cepa fúngica, su perfil enzimático y la forma en que es realizada la deslignificación, a través de cultivos axénicos o en consorcio. En la Tabla VI, se presentan los porcentajes de pérdida de materia orgánica y lignina, así como el porcentaje de digestibilidad de materia seca *in vitro*, en cuatro sustratos diferentes, procesados en cultivos axénicos de cuatro especies de hongos de pudrición blanca (Nayan *et al.*, 2019).

**Tabla VI.** Porcentajes de pérdida de MO y lignina, y cambios en % DIV-MS en diferentes productos agrícolas tratados con hongos de pudrición blanca

HONGO	SUSTRATO	Porcentaje de pérdida		Cambios en el % de
		MO	Lignina	DIV-MS
<i>Stropharia rugosoannulata</i>	Tallos de caña	22.8	33.9	16.1
	Paja de canola	28.0	58.2	48.2
	Tallos de girasol	24.4	46.8	-2.3
	Cáscara de arroz	19.9	42.1	-5.4
<i>Pleurotus florida</i>	Tallos de caña	29.5	55.8	15.0
	Paja de canola	30.1	67.6	37.1
	Tallos de girasol	27.4	60.3	20.8
	Cáscara de arroz	9.1	21.3	-9.4
<i>Pleurotus cornucopiae</i>	Tallos de caña	26.2	35.5	32.6
	Paja de canola	44.5	68.1	27.8
	Tallos de girasol	43.2	59.6	22.9
	Cáscara de arroz	ND	ND	ND
<i>Agrocybe aegerita</i>	Tallos de caña	8.4	2.0	-13.7
	Paja de canola	24.0	36.0	-6.7
	Tallos de girasol	17.7	13.4	-8.7
	Cáscara de arroz	6.6	12.6	-7.9

**Acotaciones:** MO= Materia Orgánica; DIV-MS= Degradabilidad *in vitro* de Materia Seca; ND= No disponible.

**Fuente:** Modificado de Zadrazil *et al.*, 1996

Los valores de esta tabla, muestran cómo a pesar de tratarse del mismo sustrato, se establecen diferencias dependiendo de la especie de hongo de que se trate. Como ejemplo, en el caso de los tallos de caña, la especie más eficiente en la degradación de lignina es *Pleurotus florida*, seguida por *P. cornucopiae*, en tanto que la menos eficiente es *Agrocybe aegerita*; sin embargo, en términos de digestibilidad *in vitro*, fue *P. cornucopiae* la que más la incrementó. Los valores negativos de DIV-MS, representan que la digestibilidad se redujo respecto a los valores previos al tratamiento, a pesar de la disminución del contenido de lignina, ya que depende de las interacciones que se establezcan entre las enzimas y el sustrato, así como del grado de lignificación inicial.

La actividad enzimática de los hongos, no sólo influye en la proporción de los contenidos de lignina, hemicelulosa y celulosa (aunque es mucho menor su degradación) de los forrajes, sino que su crecimiento también modifica su composición química, valor y calidad nutricional. Di-



versas investigaciones han demostrado que los residuos post-cultivo de los hongos, mejoran la calidad del sustrato inoculado para la alimentación de rumiantes, no sólo por la reducción significativa en su lignificación, sino por la adición de proteínas, carbohidratos y vitaminas provenientes del micelio y de los cuerpos fructíferos que quedan como remanentes en el sustrato agotado; por lo que la conversión del forraje producida durante el cultivo de los hongos, al incrementar el valor nutricional del forraje, resulta ser un producto con valor agregado, perfectamente utilizable por los rumiantes (Villas-Bôas *et al.*, 2002).

El micelio fúngico genera un efecto positivo en el contenido de proteína, en gran medida por la captura de nitrógeno durante la fermentación, aunque se tiende a señalar que el mayor contenido proteico se origina por la descomposición de la materia orgánica, que es utilizada por los hongos para su crecimiento y desarrollo (Taniguchi *et al.*, 2005; Zheng *et al.*, 2021; Datsomor, Zhao y Miao, 2022). De igual forma, en investigaciones donde se realiza la cuantificación de carbohidratos, se ha identificado el aumento en su contenido, principalmente de azúcares solubles destacando los cultivos de *Pleurotus ostreatus*, *P. sajor-caju*, *P. flavellatus*, *Dichomitus squalens* y *Ceriporiopsis subvermisporea* (Deswal *et al.*, 2013; Kowalczyk *et al.*, 2019; van Erven *et al.*, 2019), así como el aumento de la fracción degradable de la fibra detergente ácida que es fundamental para mejorar la fermentación ruminal.

Un aspecto fundamental, es la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) (Zadrazil *et al.*, 1996; Zhao *et al.*, 2015), que como último producto después de la fermentación de los carbohidratos, sirven como reserva de energía para los rumiantes y reflejan la digestibilidad del alimento. Los AGV totales en varios grupos de tratamiento con hongos se alinearon con la DIVMS (digestibilidad *in vitro* de la materia seca), interpretando que esta producción, se asocia a que el sustrato con mayor valor de digestibilidad, implica un mayor acceso a los carbohidratos fermentables por parte de los microorganismos ruminales, lo que a su vez produce un mayor AGV total en comparación con el sustrato con menor valor de digestibilidad (Datsomor, Zhao & Miao, 2022). Así mismo, se ha determinado el incremento de cenizas, que se vincula con la degradación y posterior liberación de minerales dentro del sustrato por parte de los hongos (Ortega *et al.*, 1986; Tuyen *et al.*, 2013).

En general, se reporta el mantenimiento de la fracción degradable de la fibra detergente neutra (FDN) lo que mejora la fermentación ruminal. Esto es muy importante, ya que el aporte de FDN en los forrajes es indispensable para los rumiantes, ya que se relaciona con la actividad masticatoria realizada durante la rumia (Zadrazil *et al.*, 1996; Fazaeli *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2015).

Aunque hay variaciones en las proporciones, con base en los resultados generados de cultivos realizados con diferentes sustratos, en general se concuerda que el valor y calidad nutritiva de los sustratos se enriquece, por lo que pueden ser empleados de forma más eficiente en la alimentación animal (Zhao *et al.*, 2015; Niu *et al.*, 2018; Kowalczyk *et al.*, 2019).

En la mejora del valor nutricional de los alimentos altamente lignificados para rumiantes, se ha determinado la existencia de una interacción hongo-sustrato sobre los valores nutricionales de los subproductos fibrosos, de modo que la mejora nutricional para algunos hongos aumenta linealmente con el nivel de lignina en sustratos (Tuyen *et al.*, 2013).

Los cambios que se producen en el forraje pre-tratado con los hongos de la pudrición blanca, asociados con el incremento de nutrimentos y la reducción considerable de lignina, también modifica la estructura de las paredes celulares de modo que también aumenta su digestibilidad, lo que ha sido demostrado tanto *in vitro* (DMOiv), como *in vivo* en animales fistulados; lo que incrementa el aporte energético de los animales, por la producción de ácidos grasos volátiles. Las potencialidades de los hongos son amplias; se ha determinado que especies como *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii*, *Pleurotus florida*, *Ceriporiopsis subvermispora*, *Lentinula edodes* y tres especies de *Phlebia* (incluidas *P. brevispora*, *P. radiata* y *P. fascicularia*), son altamente selectivas para la degradación de la lignina y poseen la capacidad potencial para mejorar la digestibilidad de los subproductos agrícolas (Mukherjee & Nandi, 2004; Zhao *et al.*, 2015). En la Tabla VII, se muestran las modificaciones que producen algunos hongos, respecto de un control no tratado, en la composición química de la paja de canola (paja de colza).

**Tabla VII.** Composición química (g/100g MS) de paja de canola pre-tratada por 30 días con diferentes tipos de hongos de la pudrición blanca

Compuesto	CONTROL	<i>Phlebia acerina</i>	<i>Ceriporiopsis subvermispora</i>	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	<i>Lentinula edodes</i>
Cenizas	3.20 <sup>C</sup>	4.38 <sup>ab</sup>	4.22 <sup>b</sup>	4.95 <sup>a</sup>	4.28 <sup>ab</sup>
Fibra Detergente Neutra (FDN)	74.3 <sup>a</sup>	71.8 <sup>ab</sup>	68.4 <sup>b</sup>	61.6 <sup>C</sup>	60.9 <sup>C</sup>
Fibra Detergente Ácida (FDA)	56.4 <sup>a</sup>	54.9 <sup>a</sup>	57.0 <sup>a</sup>	47.4 <sup>b</sup>	46.2 <sup>b</sup>
Proteína Cruda	3.86 <sup>b</sup>	2.84 <sup>C</sup>	4.70 <sup>a</sup>	4.73 <sup>a</sup>	5.04 <sup>a</sup>
Lignina Detergente Ácida (LDA)	12.2 <sup>ab</sup>	12.4 <sup>ab</sup>	12.8 <sup>a</sup>	11.3 <sup>b</sup>	11.1 <sup>b</sup>
Hemicelulosa	18.0 <sup>a</sup>	16.9 <sup>ab</sup>	11.4 <sup>b</sup>	14.2 <sup>ab</sup>	14.7 <sup>ab</sup>
Celulosa	40.0 <sup>a</sup>	38.0 <sup>a</sup>	40.0 <sup>a</sup>	31.1 <sup>b</sup>	30.8 <sup>b</sup>
Quitina	0.028 <sup>d</sup>	0.169 <sup>C</sup>	0.305 <sup>a</sup>	0.224 <sup>b</sup>	0.215 <sup>b</sup>

**Acotaciones:** <sup>a-d</sup> Dentro de una fila, los medios sin una letra en superíndice común difieren,  $P \leq 0.05$

**Fuente:** Adaptado de Zhao *et al.* (2015)

En las mediciones de la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DMSiv), que es una determinación de la calidad de los forrajes en los rumiantes, que permite establecer una correlación de los resultados que se obtendrán cuando los forrajes son suministrados y procesados por los animales (digestibilidad *in vivo*); se ha encontrado que durante el tratamiento fúngico, en los sustratos (pajas u otros residuos agrícolas) los niveles superiores presentan un aumento en la digestibilidad de entre 18.7 y 18.3 unidades, en tanto que los más profundos de 7.0, por lo que el valor promedio se incrementa en 13.8 unidades de digestibilidad, que resultan ser comparables con los obtenidos cuando la deslignificación se realiza por medios químicos empleando amoníaco o hidróxido de sodio.

Diversas investigaciones reportan que el tratamiento de los sustratos con los hongos, aumentan su digestibilidad. Se ha determinado que cuando es mayor la pérdida de lignina, la digestibilidad aumenta. Estos resultados se han reportado para diferentes sustratos y especies de hongos, en los que se correlaciona la pérdida de lignina y FDA, el incremento de FDN y su relación con el incremento de la digestibilidad. Como ejemplo, en un estudio realizado con heno de pangola (*Digitaria decumbens*) inoculado con *Pleurotus ostreatus*, después de mantener el cultivo por 30 días, se obtuvieron los siguientes resultados: lignina (-) 27,94%, FDN (+) 51,52% FDA (-) 26,13%, DMSiv (+62.7%) (WingChing-Jones y Alvarado, 2009). Resultados similares se muestran para otros sustratos y especies de hongos: en cáscara de semilla de algodón inoculada con *Pleurotus ostreatus* (Li, Pang & Zhang, 2001); pre-tratamiento en rastrojo de maíz inoculado con *Irpelex lacteus*, *Pleurotus ostreatus* y *Pleurotus cystidiosus* (Zuo et al., 2018) y pre-tratamiento en paja de trigo inoculada con *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii* y *Lentinula edodes* (Atalar & Cetinkaya, 2020), entre otros.

Al igual que la digestibilidad, se ha determinado que la degradabilidad también se mejora con los pre-tratamientos fúngicos; incluso cuando han sido empleados pastos no esterilizados como sustrato, que fueron inoculados con *Flammulina velutipes*, encontrando que, aunque se obtuvo una eliminación de lignina del 22%, se mejoró la degradabilidad (Kasprzycka et al., 2018). En otro estudio en el que se comparó el desempeño de dos cepas nativas (RN81 y RN82) de *Pleurotus djamor* contra una extranjera (RN2) de *Pleurotus pulmonaris* en dos sustratos diferentes (rastrojo de maíz y paja de arroz), para determinar los cambios en la degradabilidad *in situ*, se obtuvo que la degradabilidad aumentó, sin mostrar diferencias significativas entre las especies (Ruilloba et al., 2014).

Desde una orientación diferente, en una investigación realizada con el propósito de mejorar la degradabilidad ruminal de las frondas de la palma aceitera, se emplearon extractos enzimáticos de tres hongos de pudrición blanca (*Ceriporiopsis subvermisporea*, *Lentinula edodes* y *Ganoderma lucidum*); la degradabilidad ruminal de la paja se evaluó mediante la técnica PGiv (Producción de gas *in vitro*). Se encontró que *C. subvermisporea* y *L. edodes* mejoraron significativamente la PGiv de todos los tipos

de pajuela en un 33,6 % y un 20,4 %, respectivamente. Se concluyó que *C. subvermisporese* en términos de significancia estadística ( $P < 0,05$ ) se desempeñó mejor que *L. edodes* en la mejora de la degradabilidad de la paja en todas las etapas. Los resultados con *G. lucidum* fueron poco significativos (Nicholas *et al.*, 2020).

Estos estudios ejemplifican las diferentes orientaciones que se han dado a la investigación sobre las modificaciones en la degradación de los forrajes pre-tratados con hongos de la pudrición blanca. Como es de esperarse, si bien las proporciones tienden a modificarse en función de la especie de hongo, el sustrato o el procedimiento empleado, en general se reporta que el pre-tratamiento del forraje, modifica su degradabilidad en comparación con los controles que no fueron pre-tratados por los hongos, mejorando la fermentación ruminal (Tuyen *et al.*, 2012). En la Tabla VIII, se presentan de forma comparativa, algunos datos de la fermentación ruminal *in vitro* y de la digestibilidad de materia orgánica, de paja de canola incubada con cuatro tipos de hongos.

**Tabla VIII.** Características de la fermentación ruminal *in vitro* y digestibilidad enzimática de la materia orgánica de paja de canola incubada con cuatro hongos de pudrición blanca durante 30 días.

Compuesto	CONTROL	<i>Phlebia acerina</i>	<i>Ceriporiopsis subvermisporese</i>	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	<i>Lentinula edodes</i>
Total de AGV (mM)	28.3 <sup>b</sup>	21.8 <sup>c</sup>	26.3 <sup>bc</sup>	34.8 <sup>a</sup>	30.9 <sup>ab</sup>
<b>Valores individuales (mM)</b>					
Acetato	19.3 <sup>bc</sup>	15.9 <sup>c</sup>	18.4 <sup>bc</sup>	25.5 <sup>a</sup>	21.5 <sup>b</sup>
Propionato	5.8 <sup>a</sup>	3.0 <sup>b</sup>	3.7 <sup>b</sup>	5.8 <sup>a</sup>	5.7 <sup>a</sup>
Butirato	2.6	2.2	3.0	2.6	2.6
Valerato	0.37	0.29	0.53	0.42	0.59
AGV-CR	0.24 <sup>c</sup>	0.31 <sup>bc</sup>	0.57 <sup>a</sup>	0.54 <sup>a</sup>	0.52 <sup>ab</sup>
Acetato/Propionato	3.33 <sup>d</sup>	5.26 <sup>a</sup>	4.98 <sup>ab</sup>	4.40 <sup>bc</sup>	3.80 <sup>cd</sup>
DMO <sub>iv</sub> (%)	37.7 <sup>b</sup>	21.7 <sup>d</sup>	33.2 <sup>c</sup>	44.2 <sup>a</sup>	41.2 <sup>ab</sup>
%DMO	26.3 <sup>a</sup>	19.3 <sup>b</sup>	21.7 <sup>b</sup>	26.3 <sup>a</sup>	25.9 <sup>a</sup>

**Acotaciones:** AGV= Ácidos grasos volátiles; AGV-CR= Ácidos grasos volátiles de cadena ramificada; DMO<sub>iv</sub>= Degradabilidad de materia orgánica *in vitro*; %DMO= Porcentaje de digestibilidad enzimática de materia orgánica

**Fuente:** Adaptado de Zhao *et al.* (2015)

## Forrajes pre-tratados por hongos de la pudrición blanca en la alimentación de rumiantes

Las diversas investigaciones que se han desarrollado, prácticamente desde hace 50 años, en torno al uso de los hongos de la pudrición blanca para el pre-tratamiento de los forrajes, con el objetivo de mostrar su efectividad en la degradación de lignina, el incremento de su valor y calidad nutricional, digestibilidad, degradabilidad y demás aspectos que se han desarrollado de manera previa, han contribuido a un mejor conocimiento sobre las potencialidades de este recurso como medio para lograr una ganadería sustentable, a partir de la optimización de los recursos que se generan en la producción agrícola, que en muchas de las ocasiones son desperdiciados, quemados o, en el mejor de los casos, proporcionados a los animales como única fuente de alimento, a pesar de las serias restricciones que presentan para cubrir las necesidades de los rumiantes. El interés creciente por encontrar alternativas viables que impidan que esta situación se mantenga, ha incentivado el desarrollo de investigaciones *in vivo*, a partir de las cuales se puedan extrapolar los resultados alcanzados hasta ahora de forma experimental. Desde hace algunos años, se ha aplicado este conocimiento para probar su efectividad, tanto en pequeños rumiantes como las ovejas y cabras, como en bovinos, empleando la biomasa pre-tratada con hongos como ingrediente en alimentos de estos animales, que se ha demostrado es de mejor calidad y valor nutricional (van Kuijk *et al.*, 2015). A continuación, se recuperan 3 investigaciones realizadas con estas especies animales, para mostrar los resultados alcanzados.

En una investigación con ovinos Pelibuey, se suministró paja de maíz pre-tratada con *Pleurotus ostreatus*, estableciendo un control con paja que no fue tratada. Ambas dietas consistieron de 35.4% de grano de trigo, 13% de harina de soya, 1.6% de sales minerales y 50% de paja de maíz (tratado para el lote experimental, y sin tratar para el testigo). Después de la cosecha de las setas, los sustratos fueron secados al sol, se molieron a través de una criba de 1 mm para mezclarla con el alimento que fue ofrecido a libertad. Las ovejas fueron adaptadas a cada dieta durante 12 días, registrando su peso. Después del periodo de adaptación, se alimentaron con las dietas correspondiente durante 56 días, tomando el peso cada 14 días. El peso final del periodo de adaptación, fue tomado como el peso vivo inicial. Para la valoración estadística, se determinó la ganancia de peso y la conversión alimenticia para ambos lotes. No hubo diferencias significativas entre la proteína cruda presente en ambos sustratos. Con base en la materia seca, se determinó que la dieta con paja pre-tratada con los hongos presentó más proteínas hidrosolubles (0.69%)

y carbohidratos hidrosolubles (0.76%) que la del lote control 0.54% y 0.37%, respectivamente. La FDN en el lote tratado fue menor (62.79%) que el lote testigo (70.64%); pero el contenido de ceniza fue mayor en el lote tratado (6.44%) respecto del control (2.74%). El valor nutricional del lote tratado fue mayor. Las ovejas alimentadas con la paja pre-tratada la digirieron mejor y más rápidamente que el control, mostrando además un consumo voluntario mayor, una mayor conversión alimenticia. Se concluyó que *P. ostreatus* es útil en la alimentación animal (Díaz-Godínez y Sánchez, 2002).

En otro estudio realizado con cabras, para evaluar el efecto del sustrato agotado de *Pleurotus ostreatus* (POSS) sobre la composición química, la capacidad antioxidante, los monómeros de lignina y la digestibilidad *in vitro* del ensilaje de maíz de planta entera (WPCS), así como el desempeño de cabras lactantes alimentadas con ensilaje de maíz tratado con diferentes niveles de POSS. En el experimento 1 se probaron 4 niveles de enzimas lignocelulolíticas en un diseño al azar: 0, 10, 20 y 30 mg de enzimas lignocelulósicas por kilogramo de materia fresca, 4 repeticiones por tratamiento (bolsas selladas al vacío). Las bolsas se abrieron 60 días después del ensilaje. En el experimento 2, el ensilaje de maíz tratado con 3 niveles de enzimas (0, 10, o 30 mg/kg de materia fresca) se administró a cabras lactantes como parte de la ración mixta total. Se emplearon 9 cabras Saanen lactantes. En el experimento 1, la FDN, FDA, lignina y celulosa disminuyeron cuadráticamente en los WPCS tratados con POSS. En el punto más bajo, POSS disminuyó la FDN en un 14,1 %, la FDA en un 19,5 %, la lignina en un 9,07 % y la celulosa en un 22,1 % en comparación con el ensilaje sin tratar. Se determinó que POSS condujo a un aumento cuadrático en la digestibilidad de la materia seca *in vitro* de WPCS, en comparación con el ensilado no tratado. En el experimento 2, POSS aumentó cuadráticamente la digestibilidad de la FAD del tracto total *in vivo*. Además, la concentración de polifenoles en la leche de cabras aumentó linealmente con la adición de POSS, y no se observaron diferencias entre los tratamientos para el rendimiento y la composición de la leche. Se concluyó que la adición de 10 mg de enzimas lignocelulolíticas de POSS por kilogramo de materia fresca de maíz integral al ensilar tuvo una reducción más evidente en la concentración de lignina y celulosa, lo que llevó a una mayor digestibilidad *in vitro*, así como una mayor digestibilidad de FDA *in vivo*; sin embargo, la producción de leche no fue diferente entre los tratamientos (Agustinho *et al.*, 2021b).

Finalmente, para los bovinos se recupera una de las primeras investigaciones realizadas *in vivo*, en la que se parte de la premisa de que los estudios sobre los valores nutritivos de la paja tratada con hongos, se

limitan a la digestibilidad *in vitro* (hasta ese momento) para a partir de ello, hacer inferencias sobre la nutrición en rumiantes. A partir de esta consideración, se realizó una investigación con vacas lecheras para analizar de forma comparativa los efectos de incorporar a la dieta paja de trigo tratada con hongos en vacas lactantes, estableciendo un control en que se integra paja de trigo sin tratar. Se formularon dos dietas experimentales, a base de concentrado en una proporción 50:50. En ambas dietas el concentrado era el mismo, variando sólo lo correspondiente al forraje: el 20% era heno de alfalfa y el 30% restante, paja de trigo sin tratar (UWS) para el lote control y paja tratada con *Pleurotus ostreatus* (FTWS), para el experimental. El concentrado consistía en cebada molida, salvado de trigo, torta de semilla de algodón y minerales. El forraje y el concentrado se mezclaron y se ofrecieron a libertad como mezcla total de ración (TMR) a las 07:30, 13:30 y 19:30 horas. Los resultados obtenidos fueron que la dieta FTWS tuvo una proporción de fibra cruda (FC) significativamente ( $p<0.05$ ) más bajo, FND, FAD y LDA que la dieta UWS. Excluyendo CF y hemicelulosa (HCL), digestibilidad de la energía y otros componentes fue significativamente ( $p<0.05$ ) mayor en la dieta contenía FTWS en comparación con la dieta UWS. La ganancia promedio de peso corporal fue de 272 y 743 g por día para vacas alimentadas con UWS y FTWS, respectivamente, que fue significativamente ( $p<0.05$ ) diferente entre las dietas. A partir de estos resultados, se llegó a la conclusión de que la fermentación fúngica mejoró los valores nutritivos de la paja al reducir su contenido de pared celular medido por los contenidos de FND, FAD y LDA. En comparación con la dieta de control, la inclusión de la paja de trigo tratada con hongos aumentó significativamente ( $p<0.05$ ) la digestibilidad total del tracto de materia seca (MS), materia orgánica (MO), proteína cruda (PC), FDN, FDA, celulosa y energía bruta (EB) de la dieta (Fazaeli *et al.*, 2004).

## Reflexiones finales

Los sistemas de producción extensivos, especialmente los de pequeña escala, representan una fuente complementaria de recursos para los campesinos, que ven en el uso de los residuos agrícolas como forraje, una forma de optimizar el uso de sus cosechas, generar ingresos adicionales, y en muchas ocasiones como la única posibilidad de tener acceso y disponibilidad productos pecuarios como la carne y leche, para el consumo familiar. Dejando de lado las condiciones de los espacios acondicionados en los que se ubican los animales, que presentan diferentes áreas de oportunidad para procurar el bienestar animal; es común observar el deterioro del estado físico de los animales, que en gran medida obedece a una dieta insuficiente en cantidad y deficiente en nutrimentos que puedan ser asimilados por los animales, lo que hace necesario proponer e instrumentar alternativas viables que lleven a superar esta condición.

La diversidad de residuos agrícolas locales que se generan, representan un buen potencial para que en las zonas rurales se puedan producir alimentos no tradicionales, como es el caso de los hongos seta (*Pleurotus* spp), como alternativa para una utilización más efectiva de los residuos agrícolas mediante su bioconversión, lo que ofrece la posibilidad de generar valor al ofrecer una fuente alterna de alimento para los productores y sus familias, así como de utilizar los sustratos agotados empleados para su cultivo como alimento para rumiantes, lo que representa un recurso alimentario alternativo, de mejor calidad nutricional y digestibilidad para los rumiantes, lo cual es de especial relevancia para la producción animal sostenible, sobre todo en las condiciones actuales.

### Referencias citadas

- Agustinho, B.C., J.L.P. Daniel, L.M. Zeoula, L.F. Ferraretto, H.F. Monteiro, M.R. Pupo, L.G. Ghizzi, M.C.N. Agarussi, C. Heinzen, R.R. Lobo, A.D. Ravelo & A.P. Faciola (2021a). Effects of lignocellulolytic enzymes on the fermentation profile, chemical composition, and in situ ruminal disappearance of whole-plant corn silage. *J Anim Sci.* 99(11): skab295. doi: 10.1093/jas/skab295.
- Agustinho, B.C., J.L.P. Daniel, L.M. Zeoula, C.R. Alcalde, E. Machado, J.M. Bragatto, C.R. Schneider, N.W. Santos, P.T. Matumoto-Pintro, B.R. Saraiva, J.A.C. Osorio & A.P. Faciola (2021b). Enzymatic effects of *Pleurotus ostreatus* spent substrate on whole-plant corn silage and performance of lactating goats. *J Dairy Sci.* 104(11):11660-11672. doi: 10.3168/jds.2021-20775.
- Améndola-Massiotti, R.D., E. Castillo-Gallegos & P.A. Martínez-Hernández (2005). *Country Pasture/Forage Resource Profiles. Mexico*. FAO. [https://www.researchgate.net/publication/325859440\\_FAO\\_Country\\_PastureForage\\_Resource\\_Profiles\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/325859440_FAO_Country_PastureForage_Resource_Profiles_Mexico)
- Araiza-Rosales, E., E. Delgado-Licon, F.O. Carrete-Carreón, H. Medrano-Roldán, A. Solís-Soto, M. Murillo-Ortiz y C. Haubi-Segura (2013). Degradabilidad ruminal *in situ* y digestibilidad *in vitro* de diferentes formulaciones de ensilados de maíz-manzana adicionado con melaza. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 17(2): 79-96. <http://www.ucol.mx/revaia/portal/pdf/2013/mayo/7.pdf>
- Araujo-Febres, O. (2005). *Factores que afectan el consumo voluntario en bovinos a pastoreo en condiciones tropicales*. IX Seminario de pastos y forrajes. [http://www.ucv.ve/fileadmin/user\\_upload/facultad\\_agronomia/Consumo\\_a\\_pastoreo\\_II.pdf](http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Consumo_a_pastoreo_II.pdf)
- Arora, D.S., M. Chander & P.K. Gill (2002). Involvement of lignin peroxidase, manganese peroxidase and laccase in degradation and selective ligninolysis of wheat straw. *International Biodeterioration & Biodegradation*, Volu-



me 50, Issue 2: 115-120, doi: 10.1016/S0964-8305(02)00064-1

- Atalar, A. & N. Çetinkaya (2020). Treatment of corn straw with *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus eryngii* and *Lentinula edodes* to improve the digestibility of the lignocellulosic complex. *J. Anatol. Environ. Animal Sci.* 5, 765–771, doi: 10.35229/jaes.812010
- Bach, A. y S. Calsamiglia (2006). *La fibra en los rumiantes: ¿Química o Física?* Grupo de Investigación en Nutrición, Manejo y Bienestar Animal. IR-TA-Unidad de Rumiantes [https://produccion-animal.com.ar/informacion\\_tecnica/manejo\\_del\\_alimento/100-fibra\\_en\\_rumiantes.pdf](https://produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/100-fibra_en_rumiantes.pdf)
- Barahona, R.R. y S. Sánchez (2005). *Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales y estrategias para aumentarla. Revista Corpoca. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, vol. 6, núm. 1, enero-junio, 2005, pp. 69-82. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945018010.pdf>
- Basurto, G.R., A. Escamilla, S. Moya, E. Ramírez y J. Becerra (2012) Composición química, digestibilidad y cinética ruminal de la digestión de residuos agrícolas tratados con explosión de vapor, *Rev Mex Ciencias Pecuarias*, 3(4):407-425. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v3n4/v3n4a1.pdf>
- Betancourt L.C.A. (2019). *El empleo del ácido linoleico conjugado (CLA) en rumiantes.* <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/aditivos-empleo-acido-linoleico-t44306.htm>
- Buswell, J.A., Y.J. Cai, S.T. Chang, J.F. Peberdy, S.Y. Fu & H.S. Yu (1996). Lignocellulolytic enzyme profiles of edible mushroom fungi. *World J Microbiol Biotechnol.* 12(5):537-42. doi: 10.1007/BF00419469.
- Cáceres, O. y E. González (2020). Metodología para la determinación del valor nutritivo de los forrajes tropicales. *Pastos y Forrajes* 23(2): 87-103. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01190063/document>
- Callejo, R.A. y V. Díaz (2004). *El proceso de henificación.* Conservación de forrajes II: 17-37. [https://oa.upm.es/34353/1/INVE\\_MEM\\_2004\\_186667.pdf](https://oa.upm.es/34353/1/INVE_MEM_2004_186667.pdf)
- Camacho, V.J.H., F. Cervantes, M.I. Palacios, A. Cesín y J. Ocampo (2017) Especialización de los sistemas productivos lecheros en México: la difusión del modelo tecnológico Holshtein. *Rev Mex Cienc Pecu*, 8(3): 259-268. doi: 10.22319/rmcp.v8i3.4191.
- Caravaca, R.F. (2018). *Introducción a la alimentación y racionamiento animal.* Agroindustriales. <https://agro.siglotel.com/introduccion-a-la-alimentacion-y-racionamiento-animal/>
- Carbajo, G.J.M. (2015). *Utilización de los hongos de podredumbre blanca en la producción de pasta de celulosa de alto rendimiento.* Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/32794/1/T36284.pdf>

- Cardoso, W.S., P.V. Queiroz, G.P. Tavares, F.A. Santos, F.E.F. Soares, M.C.M Kasuya & J.H. Queiroz (2018). Multi-enzyme complex of white rot fungi in saccharification of lignocellulosic material. *Braz J Microbiol*, 49(4):879-884. doi: 10.1016/j.bjm.2018.05.006.
- Carro, M.D., M.J. Ranilla, F.J. Giráldez & A.R. Mantecón (2006) Effects of malate on diet digestibility, microbial protein synthesis, plasma metabolites, and performance of growing lambs fed a high-concentrate diet. *J Anim Sci*. 84(2):405-10. doi: 10.2527/2006.842405x.
- CEDRSSA (2020). *Política Pecuaria y Ganadería Sostenible*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. LXIV Legislatura, Cámara de Diputados. <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/34PoliticaPecuariaN.pdf>
- Chang, V.S. & M.T. Holstzapple (2000). Fundamental factors affecting biomass enzymatic reactivity. *Appl Bioch Biotechnol*;84-86 (1):5-37, doi:10.1385/ABAB:84-86:1-9:5
- Cooper, B.B.L. (2013). Enzimas xilanolíticas bacterianas y sus aplicaciones industriales. *VERTIENTES, Rev. Esp en Ciencias de la Salud*, 16(1): 19-22. <https://www.medigraphic.com/pdfs/vertientes/vre-2013/vre131e.pdf>
- Cruz-Vázquez, A., A. Tomasini, A. Armas-Tizapantzi, J. Marcial-Quino, & A.M. Montiel-González (2022). Extracellular proteases and laccases produced by *Pleurotus ostreatus* PoB: the effects of proteases on laccase activity. *Int Microbiol*, doi: 10.1007/s10123-022-00238-9.
- Datsomor, O., G.Q. Zhao & L. Miao (2022). Effect of ligninolytic axenic and co-culture white-rot fungi on rice straw chemical composition and in vitro fermentation characteristics. *Sci Rep* 12(1): 1129, 2022 01 21. <https://www.nature.com/articles/s41598-022-05107-z>
- De Blas, C., P. García Rebollar, M. Gorrachategui y G.G. Mateos (2019). Tablas FEDNA 2019, 4ta. Edición, Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. <https://www.fundacionfedna.org/ingredientes-para-piensos>
- De la Cruz, P.J.A. (2018). *Nitrógeno no proteico*. <https://www.ganaderia.com/capsula-nutricional-alltech/Nitro%CC%81geno-no-proteico>
- Deswal, D., R. Gupta, P. Nandal & R.C. Kuhad (2013). Fungal pretreatment improves amenability of lignocellulosic material for its saccharification to sugars. *Carbohydrate Polimers*, Volume 99:264-269, doi: 10.1016/j.carbpol.2013.08.045.
- Devillard, E., F.M. McIntosh, C.J. Newbold & R.J. Wallace (2006). Rumen ciliate protozoa contain high concentrations of conjugated linoleic acids and vaccenic acid, yet do not hydrogenate linoleic acid or desaturate stearic acid. *The British Journal of Nutrition*, 96:697-704, doi:10.1079/

BJN20061884

- Díaz-Godínez, D. y C. Sánchez (2002). *In situ* digestibility and nutritive value of maize straw generated after *Pleurotus ostreatus* cultivation. *Can. J. Anim. Sci.* 82:617–619. <https://doi.org/10.4141/A02-031>
- Ding, C., X. Wang & M. Li (2019). Evaluation of six white-rot fungal pretreatments on corn stover for the production of cellulolytic and ligninolytic enzymes, reducing sugars, and ethanol. *Appl Microbiol Biotechnol.* 2019 Jul;103(14):5641-5652. doi: 10.1007/s00253-019-09884-y.
- Elisashvili, V., E. Kachlishvili, T. Khardziani & S.N. Agathos (2010). Effect of aromatic compounds on the production of laccase and manganese peroxidase by white-rot basidiomycetes. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 37, 2010, p. 1091-1096, doi: 10.1007/s10295-010-0757-y
- Fazaeli, H., H. Mahmodzadeh, Z. Jelan, Y. Rouzbehan, J. Liang & A. Azizi (2004). Utilization of fungal treated wheat straw in the diet of late lactating cow. *Asian Aust. J. Anim. Sci.* 17(4):467-472. <https://www.koreascience.or.kr/article/JAKO200410103466604.pdf>
- Fernández, H.H. (2010). *Tabla de composición de alimentos para rumiantes*. Nutrición Animal, INTA EEA Balcarce. [https://www.produccion-animal.com.ar/tablas\\_composicion\\_alimentos/46-Tabla.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/tablas_composicion_alimentos/46-Tabla.pdf)
- Fernández, M.A. (2014). *Algunas consideraciones sobre la fracción fibrosa de un alimento. ¿Por qué NO se debe usar la FIBRA BRUTA o CRUDA como indicador de la calidad “fibrosa” de un forraje o concentrado?* [https://www.vetcomunicaciones.com.ar/uploadsarchivos/algunas\\_consideraciones\\_de\\_la\\_fracci\\_\\_n\\_fibrosa\\_de\\_un\\_alimento.pdf](https://www.vetcomunicaciones.com.ar/uploadsarchivos/algunas_consideraciones_de_la_fracci__n_fibrosa_de_un_alimento.pdf)
- FFIA (1992). Tablas de composición de alimentos para ganado de las zonas centro y centro sur de Chile. Fundación Fondo de Investigación Agropecuaria (FFIA). Pontificia Universidad Católica de Chile. [http://www7.uc.cl/sw\\_educ/prodanim/digestiv/m7/composic.htm](http://www7.uc.cl/sw_educ/prodanim/digestiv/m7/composic.htm)
- Francesca, U. (2017). La fibra en forrajes tropicales. Factores que afectan su digestibilidad. *Revista cebú.com*. <https://www.revistacebu.com/nutricion/item/2322-la-fibra-en-forrajes-tropicales-factores-que-afectan-su-digestibilidad>
- Giraldo, L.A., L.A. Gutiérrez y C. Rúa (2007). Comparación de dos técnicas *in vitro* e *in situ* para estimar la digestibilidad verdadera en varios forrajes tropicales. *Rev Col Cienc Pec*, 20: 269-279. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v20n3/v20n3a05.pdf>
- González, M.K. (2018). *Fuentes de nitrógeno no proteico en rumiantes*. <https://zoovetespasion.com/nutricion-animal/fuentes-de-nitrogeno-no-proteico-en-rumiantes/>
- Gutiérrez, B.O. (2015). La fisiología digestiva del rumiante, objeto de investiga-

- ción en el Instituto de Ciencia Animal durante cincuenta años. *Rev Cubana de Ciencia Agrícola*, Tomo 49, Número 2: 179-188. <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193039698007.pdf>
- Hatfield, R.D. (1993). *Cell Wall Polysaccharide Interactions and Degradability* [in] Jung, H.G., Dr.R. Buxton, R.D. Hatfield & J. Ralph (Editors) Forage cell Wall structure and digestibility. <https://doi.org/10.2134/1993.foragecellwall.c12>
- Jarillo-Rodríguez, J.; E. Castillo-Gallegos, A.F. Flores-Garrido, B. Valles-de la Mora, L. Ramírez y Avilés, R. Escobar-Hernández & E. Ocaña-Zavaleta (2011). Forage yield, quality and utilization efficiency on native pastures under different stocking rates and seasons of the year in the Mexican humid tropic. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13:417-427. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93920942019>
- Jiménez, J.R.A., V. Espinosa y D.M. Soler (2014). El costo de oportunidad de la mano de obra familiar en la economía de la producción lechera de Michoacán, México. *Rev de Inv Agraria y Ambiental*, enero-junio, Volumen 5, Número 1: 47-56. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5344972>
- Jung, H.G. & D.A. Deetz (1993). Cell wall lignification and degradability. In: H.G. Jung, D.R. Buxton, R.D. Hatfield and J. Ralph (Ed.) *Forage Cell Wall Structure and Digestibility*. 1993. pp 315-339. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Hammel, K. & D. Cullen (2008). Role of fungal peroxidases in biological ligninolysis. *Curr. Opin. Plant Biol.* 11, 349–355, doi: 10.1016/j.pbi.2008.02.003
- Herrero, M. S. Wirsenius, B. Henderson, C. Rigolot, P. Thornton, P. Havlík, I. de Boer & P.J. Gerber (2015). Livestock and the Environment: What Have We Learned in the Past Decade? *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40:177–202, doi: 10.1146/annurev-environ-031113-093503
- IICAT (2015). Determinación del valor nutricional de la pradera nativa provincia José Manuel Pando, Municipio de Santiago de Machaca. Nota Técnica. Instituto de Investigación en Ciencia Animal y Tecnología, *Jour of the Selva Andina Animal Science*, Vol. 2, No. 1: 22-33. [http://www.scielo.org.bo/pdf/jsaas/v2n1/v2n1\\_a04.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/jsaas/v2n1/v2n1_a04.pdf)
- INTAGRI (2018). *Plantas C3, C4 y CAM*. Equipo Editorial INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/plantas-c3-c4-y-cam>
- Kaur, P., G.S. Kocher & M.S. Taggar (2019). Development of fungal consortium for the pretreatment of rice straw under optimized solid state and shake flask conditions. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 38, 635–646, doi: 10.1002/ep.12954
- Kasprzycka, A., J. Lalak-Kańczugowska & J. Tys (2018). *Flammulina velutipes* treatment of non-sterile tall wheat grass for enhancing biodegradability and methane production. *Bioresour Technol.* 263:660-664. doi: 10.1016/j.

biortech.2018.05.024.

- Kowalczyk, J.E., M. Peng, M. Pawlowski, A. Lipzen, V. Ng, V. Singan, M. Wang, I.G. Grigoriev & M.R. Mäkelä (2019). The White-Rot Basidiomycete *Dichomitus squalens* Shows Highly Specific Transcriptional Response to Lignocellulose-Related Aromatic Compounds. *Frontiers in Bioeng and Biotech. Research Topic: Biotechnological Production and Conversion of Aromatic Compounds and Natural Products*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2019.00229/full>
- Lang, E., A. Gonser & F. Zadrazil (2000). Influence of incubation temperature on activity of ligninolytic enzymes in sterile soil by *Pleurotus* sp. and *Dichomitus squalens*. *Journal of Basic Microbiology*, Vol. 40, Iss 1:33-39, doi: 10.1002/(sici)1521-4028(200002)40:1<33:aid-jobm33>3.0.co;2-q
- Leng, R. A. (1991). Application of biotechnology to nutrition of animals in developing countries. FAO Animal Production and Health paper 90. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/t0423e/T0423E00.htm#TOC>
- León, C.J.M., M.L. Pabón y J.E. Carulla (2011). Relación entre las características de la pastura y el contenido de ácido linoleico conjugado (ALC) en la leche. *Rev Colombiana de Ciencias Pecuarias*. 24: 63-73. <http://www.scielo.org.co/pdf/rccp/v24n1/v24n1a09.pdf>
- Li, X., Y. Pang & R. Zhang (2001). Compositional changes of cotton seed hull substrate during *P. ostreatus* growth and the effect on the feeding value of the spent substrate. *Bioresource Technology* 80:157-161. doi: 10.1016/S0960-8524(00)00170-x
- Li, X., D. Adiphol, M.A. Kabel & R.P. de Vries (2022). Fungal xylanolytic enzymes: Diversity and applications. *Bioresour Technol*, 344(Pt B): 126290, doi: 10.1016/j.biortech.2021.126290
- Litthauer, D., M.J. Van Vuuren, A. Van Tonder & F.W. Wolfaardt (2007). Purification and kinetics of a thermostable laccase from *Pycnoporus sanguineus* (SCC 108). *Enzyme and Microbial Technology*, 40: 563-568, doi: 10.1016/j.enzmictec.2006.05.011
- López-Vigoa, O., L. Lamela-López, T. Sánchez-Santana, Y. Olivera-Castro, R. García-López, M. Herrera-Villafranca y M. González-Ronquillo (2019). Evaluación del valor nutricional de los forrajes en un sistema silvopastoril. *Pastos y Forrajes*, vol. 42, no. 1: 57-67. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v42n1/2078-8452-pyf-42-01-57.pdf>
- Luna, G.R., D. Rodríguez, G. Martínez, C. Aguirre y R.A. Sánchez (2012). *Bancos de proteína para rumiantes en el Semiárido Mexicano*. SAGARPA/INIFAP. <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/publicaciones/bancpro.pdf>
- Malekhhahi M., A.M. Tahmasbi, A.A. Naserian, M. Danesh-Mesgaran, J.L. Kleen & A.A. Parand (2015). Effects of essential oils, yeast culture and malate on rumen fermentation, blood metabolites, growth performance and nu-

- trient digestibility of Baluchi lambs fed high-concentrate diets. *J Anim Physiol Anim Nutr* (Berl). 99(2):221-229. doi: 10.1111/jpn.12230.
- Manavalan, T., A. Manavalan & K. Heese (2015). Characterization of lignocellulolytic enzymes from white-rot fungi. *Curr Microbiol.* 70(4):485-98. doi: 10.1007/s00284-014-0743-0.
- Mateus, L., O. Hernández, M. Velásquez y J.J. Díaz (2012). Evaluación del pretratamiento con ácido sulfúrico diluido de pasto maralfalfa (*Pennisetum glaucum X Pennisetum purpureum*) para la producción de etanol. *Rev. Colomb. Biotecnol.* Vol. XIV No. 1: 146-156. <http://www.scielo.org.co/pdf/biote/v14n1/v14n1a13.pdf>
- Martínez, A.T., M. Speranza, F.J. Ruiz-Dueñas, P. Ferreira, S. Camarero, F. Guillén, M.J. Martínez, A. Gutiérrez & J.C. del Río (2005) Biodegradation of lignocelluloses: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *Int. Microbiol.* [online]. 2005, vol.8, n.3, pp.195-204. ISSN 1139-6709. <https://scielo.isciii.es/pdf/im/v8n3/07%20Martinez.pdf>
- Martínez-Fernández, A., A. Argamentería y B. de la Rosa (2014). *Manejo de forrajes para ensilar*. Servicio Regional de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (SERIDA) del Principado de Asturias. <http://www.serida.org/pdfs/6079.pdf>
- Maycotte, M.C.C. (2011). *Sistemas de Producción Animal*. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. [https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4782/sistemas\\_produccion\\_animal\\_i.pdf](https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4782/sistemas_produccion_animal_i.pdf)
- Mayhati, A., R. Patong, M.N. Djide & D.P. Taba (2013). Biodegradation of lignin from corn cob by using a mixture of *Phanerochaete chrysosporium*, *Lentinus edodes* and *Pleurotus ostreatus*, *International Journal of Scientific & Technology Research*, 11, 79–82. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.640.2429&rep=rep1&type=pdf>
- Mejía, H.J. e I. Mejía (2007) Nutrición proteica de bovinos productores de carne en pastoreo. *Acta Universitaria*, vol. 17, núm. 2: 45-54. <https://www.redalyc.org/pdf/416/41617206.pdf>
- Merchen, N.R. y L.D. Bourquin (1994). Processes of Digestion and Factors Influencing Digestion of Forage-Based Diets by Ruminants [in] Fahey, G.C. Jr (Editor) *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*, Chapter 14. <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c14>
- Montañez, O.D.; M.E. Cobos, A. Larqué y J.E. García (2004). Efecto de la alimentación con paja de trigo tratada con *Pleurotus florida* en la flora ruminal de ovinos. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 38, núm. 3, 2004, pp. 249-257. [https://www.redalyc.org/pdf/1930/19301784\\_9005.pdf](https://www.redalyc.org/pdf/1930/19301784_9005.pdf)
- Montoya, B.S., O.J. Sánchez y L. Levin (2014). Evaluación de actividades endonucleasa, exoglucanasa, lacasa y lignina peroxidasa en diez hongos de

podrición blanca. *Biotechnol en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, Vol. 12, No. 2:115-124. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v12n2/v12n2a13.pdf>

- Muñoz-González, J.C. M. Huerta-Bravo, A. Lara, R. Rangel y J.L. de la Rosa (2016) Producción y calidad nutrimental de forrajes en condiciones del Trópico Húmedo de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp.* Núm. 16: 3315-3327. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v7nspe16/2007-0934-remexca-7-spe16-3315.pdf>
- Muñoz, M.C. y F. Canto (2016). Nutrición y alimentación de rumiantes. *Boletín INIA*. Programa de Difusión Tecnológica en subsector pecuario bovino para el territorio Patagonia Verde. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/6872/NR42016.pdf?sequence=7&isAllowed=y>
- Mukherjee, R. & B. Nandi (2004). Improvement of in vitro digestibility through biological treatment of water hyacinth biomass by two *Pleurotus* species. *International Biodeterioration and Biodegradation*, vol. 53, no. 1: 7-12, doi: 10.1016/S0964-8305(03)00112-4
- Nam, I.S. & P.C. Garnsworthy (2006). Biohydrogenation of linoleic acid by rumen fungi compared with rumen bacteria. *J Appl Microbiol*, 103: 551-556. doi: 10.1111/j.1365-2672.2007.03317.x.
- Navarro-Ortiz, C.A. y M.L. Roa-Vega (2018). Comparación de la digestibilidad de tres especies forrajera estimada mediante diferentes técnicas. *Orinoquia*, Vol. 22, núm. 1: 15-33. <https://www.redalyc.org/journal/896/89660461002/html/>
- Nayan, N., G. van Erven, M.A. Kabel, A.S.M. Sonnenberg, W.H. Wouter, H. Hendriks & J.W. Cone (2019). Improving ruminal digestibility of various wheat straw types by white-rot fungi. *J Sci Food Agric.* 99(2): 957-965. doi: 10.1002/jsfa.9320
- Nicholas, A.F., H.A. Hassim, A.F. Nicholas, M.L. Cedillo, A.A. Dias, Y.M. Goh & V. Fievez (2020). Improving Ruminal Degradability Of Oil Palm Fronds Using Enzyme Extracts From White Rot Fungi. *Research Square*, doi: 10.21203/rs.2.21916/v1
- Niño, L.L., A. Acosta y R. Gelves (2013). Evaluación de pretratamientos químicos para la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos de yuca (*Manihot esculenta* Crantz). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, núm. 69: 317-326, <https://www.redalyc.org/pdf/430/43029812024.pdf>
- Niu, D., S. Zuo, D. Jiang, P. Tian, M. Zheng & C. Xu (2018). Treatment using white rot fungi changed the chemical composition of wheat straw and enhanced digestion by rumen microbiota in vitro. *Anim. Feed Sci. Technol.* 237, 46-54, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2018.01.005

- Núñez, H.G., E. Díaz, J.A. Espinosa, L. Ortega, L. Hernández, H.R. Vera, H. Román, M. Medina y F. de J. Ruiz (2009). *Producción de leche de bovino en el sistema intensivo*. Centro de Investigación Regional Golfo Centro, Libro Técnico Núm. 23. [https://redgatro.fmvz.unam.mx/assets/leche\\_sistemaintensivo.pdf](https://redgatro.fmvz.unam.mx/assets/leche_sistemaintensivo.pdf)
- Núñez, H.G., J.A. Payán, A. Pena, F. González, O. Ruiz y C. Arzola (2010). Caracterización agronómica y nutricional del forraje de variedades de especies anuales en la región norte de México. *Rev Mex de Cienc Pecu*, 1(2): 85-98. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcp/v1n2/v1n2a1.pdf>
- Olivera-de la Cruz, A.R., E. Ortega-Jiménez, P. Díaz-Rivera, E. Aranda-Ibáñez, J. Ramos-Juárez y G. Mendoza-Martínez (2019). Efecto de *Pleurotus ostreatus* en la degradación de residuos agrícolas. *Agrociencias* 53: 25-33, <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1748>
- Or-Rashid, M.M., N. E. Odongo & B. W. McBride (2007). Fatty acid composition of ruminal bacteria and protozoa, with emphasis on conjugated linoleic acid, vaccenic acid, and odd-chain and branched-chain fatty acids, *Journal of Animal Science*, Volume 85, Issue 5: 1228–1234, doi: 10.2527/jas.2006-385
- Or-Rashid, M.M., O. AlZahal & B.W. McBride (2008). Studies on the production of conjugated linoleic acid from linoleic and vaccenic acids by mixed rumen protozoa. *Appl Microbiol Biotechnol*. 2008 Dec;81(3):533-41. doi: 10.1007/s00253-008-1690-0.
- Ortega, A.G.M., G. Bueno, D. Betancourt, I. Álvarez y A.L. González (2005). Bio-transformación de residuos lignocelulósicos con hongos *Pleurotus*. *Rev. CENIC. Cienc. Biol.* Vol. 36, Número Especial: 1-7. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181220525083>
- Ortega C.M.E., B. Can, F. Herrera y F Pérez-Gil (1986). Efecto de la inoculación del hongo comestible *Pleurotus ostreatus* en la composición química y digestibilidad de la paja de cebada. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición* 36(2):345-350. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-37903>
- Oude E., F. Driehuis, J.C. Gottschal y S.F. Spoelstra. (2001) Los procesos de fermentación del ensilaje y su manipulación [en] FAO. *Uso del ensilaje en el trópico, privilegiando opciones para pequeños campesinos*. Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal 161. <https://www.fao.org/3/X8486S/x8486s04.htm>
- Papinutti, L. (2011). Hongos causantes de pudrición blanca: la utilización de sus enzimas ligninolíticas para el desarrollo de tecnologías de biorremediación. *Ciencia & Naturaleza*, No. 24: 40-42. [https://www.researchgate.net/publication/236876750\\_Hongos\\_causantes\\_de\\_pudricion\\_blanca\\_la\\_utilizacion\\_de\\_sus\\_enzimas\\_ligninoliticasy\\_para\\_el\\_desarrollo\\_de\\_diversas\\_tecnologias\\_de\\_biorremediacion](https://www.researchgate.net/publication/236876750_Hongos_causantes_de_pudricion_blanca_la_utilizacion_de_sus_enzimas_ligninoliticasy_para_el_desarrollo_de_diversas_tecnologias_de_biorremediacion)



- Parsons, D., C.F. Nicholson, R.W. Blake, Q.M. Ketterings, L. Ramírez-Avilés, J.H. Cherney & D.G. Fox (2011). Application of a simulation model for assessing integration of smallholder shifting cultivation and sheep production in Yucatán, Mexico. *Agricultural Systems*, Vol. 104, Núm. 1: 13-19, doi: 10.1016/j.agsy.2010.08.006
- Pick, G. (2011). Utilización de nitrógeno no proteico en recría de bovinos. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica Argentina. [https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/1234\\_56789/449/1/doc.pdf](https://repositorio.uca.edu.ar/bitstream/1234_56789/449/1/doc.pdf)
- Pineda-Insuasti, J.A., L.B. Ramos-Sánchez y C.P. Soto-Arroyave (2014). Producción de *Pleurotus ostreatus* por fermentación en estado sólido: una revisión ICIDCA. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 48, núm. 2, mayo-agosto, 2014, pp. 13-23 <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223131465002.pdf>
- Pothiraj, C., P. Kanmani & P. Balaji (2006). Bioconversion of lignocellulose materials. *Mycobiology*. 34(4):159-65. doi: 10.4489/MYCO.2006.34.4.159.
- Prieto-Manrique, E., J.E. Vargas-Sánchez, J. Angulo-Arizala y L. Mahecha-Ledesma (2017). Grasa y ácidos grasos en leche de vacas pastoreando, en cuatro sistemas de producción. *Agron. Mesoam*. Vol 28, No. 1: 19-42. doi:10.15517/am.v28i1.22816
- Quintero, D.J.C. (2011). Revisión: Degradación de plaguicidas mediante hongos de la pudrición blanca de la madera. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. Vol. 64, No. 1: 5867-5882. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/26394>
- Ramírez, L.R.G. (2009). Forrajes nativos. Una alternativa sustentable en la alimentación de rumiantes. *Ciencia UANL*, año/vol. XII, número 001:4-5. <https://www.redalyc.org/pdf/402/40212101.pdf>
- Ramírez, O.R., R.G. Ramírez y F. López (2002) Factores estructurales de la pared celular del forraje que afectan su digestibilidad. *CIENCIA UANL*, Vol. V, No.2: 180-189. <https://core.ac.uk/download/pdf/76583705.pdf>
- Relling, A.E. y G.A. Mattioli (2014). *Fisiología digestiva y metabólica de rumiantes*. Facultad de Ciencias Veterinarias UNLP. <https://ganaderiasos.com/wp-content/uploads/2014/08/fisiologia-digestiva-y-met-de-los-rumiantes.pdf>
- Ruiloba, M.H., A. Vega, H. Franco, C. Solís y R.F. García Castillo (2014). Efecto de la bio-degradación con cepas nativas de *Pleurotus djamor*, RN81 y RN82, sobre parámetros químicos y degradabilidad *in situ* de sustratos lignocelulósicos. *Revista Científica*, vol. XXIV, núm. 5: 443-453 <https://www.redalyc.org/pdf/959/95932260009.pdf>
- Ruiz, S.C. y M. Saavedra (2017). *Recurso forrajero estratégico de bajo costo. Alimentación de vacunos con pajas de cereales*. Instituto de Investigacio-

nes Agropecuarias (INIA). Informativo No. 134, [https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/\\_5cc0852968438.pdf](https://puntoganadero.cl/imagenes/upload/_5cc0852968438.pdf)

- Shen, J., Y. Chen, L.E. Moraes, Z. Yu & W. Zhu (2018). Effects of dietary protein sources and nisin on rumen fermentation, nutrient digestion, plasma metabolites, nitrogen utilization, and growth performance in growing lambs. *J Anim Sci.* 96(5):1929-1938. doi: 10.1093/jas/sky086.
- SIAP (2020). Resumen Nacional 2011-2020. Cabezas. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/655387/Inventario\\_2020\\_Resumen.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/655387/Inventario_2020_Resumen.pdf)
- Sultana, H., K. Miyazawa, S. Kanda & H. Itabashi (2011). Fatty acid composition of ruminal bacteria and protozoa, and effect of defaunation on fatty acid profile in the rumen with special reference to conjugated linoleic acid in cattle. *Anim Sci Jour*, 82(3):434-40. doi: 10.1111/j.1740-0929.2010.00854.x.
- Suttie, J.M. (2003) *Conservación de heno y paja para pequeños productores y en condiciones pastoriles*. Colección FAO: Producción y protección vegetal N° 29. <https://www.fao.org/3/x7660s/x7660s05.htm>
- Taniguchi, M., H. Suzuki, D. Watanabe, K. Sakai, K. Hoshino & T. Tanaka (2005). Evaluation of pretreatment with *Pleurotus ostreatus* for enzymatic hydrolysis of rice straw. *J Biosci Bioeng.* 100(6):637-43. doi: 10.1263/jbb.100.637.
- Téllez, A., A.P. Maqueda, Y. Mercado, M.A. Anducho y A. Arana (2009). Hongos de podredumbre blanca y bitoecnología. *Ciencia y Desarrollo*, marzo de 2009. CONACYT. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/229/Articulos/Hongos/Hongos4.html>
- Tirado-González, D.N., J. Jáuregui-Rincón, G.G. Tirado-Estrada, P.A. Martínez-Hernández, F. Guevara-Lara & L.A. Miranda-Romero (2016). Production of cellulases and xylanases by white-rot fungi cultured in corn stover media for ruminant feed applications. *Anim. Feed Sci. Technol.* 221: 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.001>
- Tuyen, V.D, J.W. Cone, J.J Baars, A.S.M. Sonnenberg & W.H. Hendriks (2012). Fungal strain and incubation period affect chemical composition and nutrient availability of wheat straw for rumen fermentation. *Bioresour. Technol.* 111, 336–342, doi: 10.1016/j.biortech. 2012.02.001
- Tuyen, D.V., H.N. Phuong, J.W. Cone, J.J.P. Baars, A.D.M. Sonnenberg & W.H. Hendriks (2013). Effect of fungal treatments of fibrous agricultural by-products on chemical composition and in vitro rumen fermentation and methane production. *Bioresour. Technol.* 129, 256–263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.128>
- Trujillo, A.I. y G. Uriarte (s/f). Valor nutritivo de las pasturas. <http://prodanimal>.

- fagro.edu.uy/ cursos/ALIMENTOS%20RUMIANTES/Trujillo\_Uriarte.VA-LOR\_NUTRITIVO\_PASTURAS.pdf
- Valásková, V. & P. Baldrian (2006). Estimation of bound and free fractions of lignocellulose-degrading enzymes of wood-rotting fungi *Pleurotus ostreatus*, *Trametes versicolor* and *Piptoporus betulinus*. *Res Microbiol.* 157(2):119-24. doi: 10.1016/j.resmic. 2005.06.004.
- Valderrama, L.F.A. (2019). *La energía y su importancia en el desempeño reproductivo de vacas lecheras*. <https://ciencia.lasalle.edu.co/zootecnia/465>
- van Erven, G., J. Wang, P. Sun, P. de Waard, J. van der Putten, G. E. Frissen, R.J.A. Gosselink, G. Zinovyev, A. Potthast, W.J.H. van Berkel & M.A. Kabel (2019). Structural Motifs of Wheat Straw Lignin Differ in Susceptibility to Degradation by the White-Rot Fungus *Ceriporiopsis subvermispora*. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 7: 20032–20042. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssuschemeng.9b05780>
- van Kuijk, S. J. A., A. S. M. Sonnenberg, J.J.P. Baars, W.H. Hendriks & J.W. Cone (2015). Fungal treated lignocellulosic biomass as ruminant feed ingredient: A review. *Biotechnol. Adv.* 33, 191–202, doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.014
- van Lier, E. y M. Regueiro (2008). *Digestión en retículo-rumen*. Facultad de Agronomía, Universidad de Montevideo. <http://prodanimal.fagro.edu.uy/cursos/AFA/TEORICOS/Repartido-Digestion-en-Reticulo-Rumen.pdf>
- Vargas, R.J.M (2007). *La composición química de los forrajes determina su calidad*. UAM-I Área de Sistemas de Producción Agropecuarios. [http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mvzjmv/calidad\\_de\\_forraje.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/mvzjmv/calidad_de_forraje.pdf)
- Vargas, R.J.M. (2016). Calidad de los forrajes para rumiantes. *Entorno Ganadero* 78, BM Editores. <https://bmeditores.mx/ganaderia/calidad-de-los-forrajes-para-rumiantes>.
- Vázquez-García, V. (2015). Ganado menor y enfoque de género. Aportes teóricos y metodológicos. Agricultura, Sociedad y Desarrollo. Colegio de Postgraduados. <https://www.redalyc.org/journal/3605/360544476003/html/>
- Villas-Bôas S.G., E. Esposito & D. Mitchell (2002). Microbial conversion of lignocellulosic residues for production of animal feeds. Review. *Animal Feed Science and Technology* 98:1-12, doi: 10.1016/S0377-8401(02)00017-2
- Wan, C. & Y. Li (2012). Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass. *Biotechnol. Adv.* 30, 1447–1457. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2012.03.003
- WingChing-Jones, R. y G. Alvarado (2009). Valor nutricional del heno de transvala inoculado con el hongo *Pleurotus ostreatus* sp. *Agronomía Costarricense*, vol. 33, núm. 1:147-153. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?idp=1&id=43612054013&cid=63230>

- Xie, C., L. Yan, W. Gong, Z. Zhu, S. Tan, D. Chen, Z. Hu & Y. Peng (2016). Effects of Different Substrates on Lignocellulosic Enzyme Expression, Enzyme Activity, Substrate Utilization and Biological Efficiency of *Pleurotus eryngii*. *Cell Physiol Biochem*. 2016;39(4):1479-94. doi: 10.1159/000447851. Epub 2016 Sep 9. PMID: 27607466.
- Zadrazil, F., D.N. Kamra, O.S. Isikhuemhen, F. Schuchardt & G. Flachowsky (1996). Bioconversion of lignocellulose into ruminant feed with white rot fungi - Review of work done at the FAL Braunschweig, *J. Appl. Anim. Res.*, 10:105-124, doi: 10.1080/09712119.1996.9706139
- Zhao, Z., J. Gong, S. Zhou, K.O. Yang, X- Song, C. Fu, L. Xu & M. Qu (2015). Effect on fundal treatments of rape straw on chemical composition and *in vitro* rumen fermentatio characteristics. *BioResources* 10(1): 622-637. [https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/viewFile/BioRes\\_10\\_1\\_622\\_Zhao\\_Fungal\\_Treatments\\_Rape\\_Straw/3232](https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/viewFile/BioRes_10_1_622_Zhao_Fungal_Treatments_Rape_Straw/3232)
- Zheng, M., S. Zuo, D. Niu, D. Jiang, Y. Tao & C. Xu (2021). Effect of four species of white rot fungi on the chemical composition and *in vitro* rumen degradability of naked oat straw. *Waste Biomass Valorization* 12, 435–443, doi: 10.1007/s12649-020-00991-w
- Zuo, S., D. Niu, M. Zheng, D. Jiang, P. Tian, R. Li & C. Xu (2018). Effect of *Irpex lacteus*, *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus cystidiosus* pretreatment of corn stover on its improvement of the *in vitro* rumen fermentation. *J. Sci. Food Agric.* 98, 4287–4295, doi: 10.1002/jsfa.8951 (2018).