



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



**MODELO PREDICTIVO PARA ESTIMAR LA CALIDAD DEL ENSILAJE A
PARTIR DE SU COMPOSICIÓN QUÍMICA EN FORRAJES**

Por:

MVZ. Ana Karen Frutis Moto

Tesis presentada como requisito para obtener el grado de
Maestra en Ciencias Agropecuarias

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P

Junio 2023





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO



**MODELO PREDICTIVO PARA ESTIMAR LA CALIDAD DEL ENSILAJE A
PARTIR DE SU COMPOSICIÓN QUÍMICA EN FORRAJES**

Por:

MVZ. Ana Karen Frutis Moto

Tesis presentada como requisito para obtener el grado de
Maestra en Ciencias Agropecuarias

COMITÉ DE TESIS:

Director: Dr. Héctor Aarón Lee Rangel

Asesor: Dr. Germán David Mendoza Martínez

Asesor: Dr. Gregorio Álvarez Fuentes

Asesor: Dr. Luis Octavio Negrete Sánchez

Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P

Junio 2023



DEDICATORIA

A mis padres, por impulsar cada uno de mis sueños y brindarme la oportunidad de decidir en cada paso.

A mis queridos hermanos por sus apoyos y consejos.

A mi tía Petra Reyna por escucharme y brindarme los mejores consejos durante estos dos años.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y en especial a la Facultad de Agronomía y Veterinaria por permitirme y brindarme el apoyo para desarrollar este trabajo

Al CONACYT por otorgarme una beca que permitió solventar el desarrollo personal y de este trabajo (CVU: 902866, No. de apoyo: 804467)

A mi familia por creer en mí, apoyarme y motivarme cada día durante esta trayectoria

A mi director de tesis Dr. Héctor Aarón Lee Rangel por la confianza que me brindó para trabajar conmigo y poder desarrollar este trabajo, así como sus enseñanzas y consejos y paciencia a través de su experiencia teórica y práctica.

A mis asesores de tesis el Dr. Gregorio Álvarez Fuentes y Dr. Luis Octavio Negrete Sánchez por la guía y el gran apoyo para la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Germán Mendoza por creer en mí durante la carrera, por mostrarme el fascinante camino de la ciencia y la investigación.

A mis compañeras de maestría por los grandes momentos compartidos durante estos dos años

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
Justificación.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivos.....	2
General.....	2
Específicos.....	3
REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Modelos Matemáticos	4
Ensilajes.....	5
Características Químicas de los Forrajes (Pre-ensilaje)	11
MATERIALES Y MÉTODOS	13
Selección de Datos	13
Integración del Modelo.....	13
Captura de datos.....	13
Desarrollo del Modelo	15
Evaluación del Modelo.....	15
Validación y ajustes del modelo	15
RESULTADOS.....	16
Estadísticas Descriptivas	16
Integración de modelos.....	17
Desarrollo del Modelo.....	19
Variables bromatológicas	19
Variables fermentativas.....	27

DISCUSIÓN	36
Variables Bromatológicas	36
Variables Fermentativas	37
CONCLUSIONES	42
LITERATURA CITADA.....	43

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Poblaciones fúngicas y bacterianas presentes en el forraje antes del ensilado.....	7
2	Principales vías metabólicas y sus productos durante la fermentación del ensilado	9
3	Promedio, rango y desviación estándar de las variables bromatológicas de los forrajes pre-ensilaje (% MS).....	16
4	Promedio, rango y desviación estándar de las variables bromatológicas y fermentativas de los ensilados (% MS).....	17
5	Índices de correlación de forraje fresco y ensilado.....	18
6	Ecuaciones predictoras de Materia Seca (Valores en %MS).....	19
7	Ecuaciones predictoras de Proteína Cruda (%MS).....	21
8	Ecuaciones predictoras de Fibra Detergente Neutra (%MS).....	22
9	Ecuaciones predictoras de Fibra Detergente Ácido (%MS).....	24
10	Ecuaciones predictoras de Extracto Etéreo (%MS).....	25
11	Ecuaciones predictoras para contenido de cenizas (%MS).....	26
12	Ecuaciones predictoras para pH (%MS).....	28
13	Ecuaciones predictoras de contenido de Ácido Láctico (%MS).....	29
14	Ecuaciones predictoras para el contenido de Ácido Acético (%MS).	31
15	Ecuaciones predictoras para Ácido Propiónico (%MS).....	33
16	Ecuaciones predictoras para Ácido Butírico (%MS).....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Selección de datos	14
2	Gráfico de ajuste Observados VS Predichos %MS.....	20
3	Gráfico de ajuste, observados VS predichos %PC.....	21
4	Gráfico de ajuste, Observados VS Predichos %FDN	23
5	Gráfico de ajuste, Observados VS Predichos %FDA.....	24
6	Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos %EE.....	26
7	Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos % cenizas.....	27
8	Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos pH.....	28
9	Gráficos de ajuste. Observados VS Predichos, contenido de Ácido Láctico (%MS).....	30
10	Gráficos de ajuste. Observados VS Predichos, contenido de Ácido Acético (%MS).....	32
11	Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos, Ácido propiónico (%MS).	34
12	Gráfico de ajuste. Observado VS Predicho, Ácido Butírico (%MS).....	35

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la formulación de ecuaciones que permitieran la predicción de variables fermentativas y bromatológicas, a partir de los datos obtenidos de artículos científicos; se utilizaron un total de 21 artículos con 51 observaciones de las bases de datos de Scopus y Web of Science. Se capturaron un total de 15 variables bromatológicas (MS, PC, NT, PDR, PnDR, CS, FDN, FDA, ASH, HEM, CNE, LIG, CT, EE y NTD) y cinco variables fermentativas (pH, ácido láctico, acético, propiónico y butírico) para la determinación de MS, PC, FDN, FDA, EE, ASH y los productos de la fermentación, se obtuvieron en total 29 ecuaciones donde el parámetro más repetido fue carbohidratos solubles, seguido del contenido de materia seca. Las mejores ecuaciones obtenidas para el contenido nutrimental fueron para las correspondientes a EE con un coeficiente de determinación de 0.97 y materia seca de 0.92, mientras que para las características fermentativas fue de 0.73 y 0.62 para ácido propiónico y pH respectivamente. Es factible el uso de estas ecuaciones para la determinación del contenido nutrimental de los ensilados a partir de su composición química en los forrajes.

Palabras clave: Fermentación, ecuaciones, predicción, metaanálisis, carbohidratos solubles.

ABSTRACT

The objective of this work was the formulation of equations that allow the prediction of fermentative and bromatological variables, from the data obtained from scientific articles; a total of 21 articles with 51 observations from the Scopus and Web of Science databases were used in total of 15 bromatological variables (MS, PC, NT, PDR, PnDR, CS, FDN, FDA, ASH, HEM, CNE, LIG, CT, EE and NTD) and five fermentative variables (pH, lactic acid, acetic acid) were captured. , propionic and butyric) for the determination of DM, PC, NDF, FDA, EE, ASH and the fermentation products, a total of 29 equations were obtained where the most repeated parameter was soluble carbohydrates, followed by the dry matter content. The best equations obtained for the nutritional content were for the various EE with a coefficient of determination of 0.97 and dry matter ($R^2=0.92$), for the fermentative characteristics the coefficient of determination for propionic acid (R^2 0.73) and pH ($R^2=$ 0.62). It is feasible to use these equations to determine the nutritional content of silages from their forage's chemical composition.

Keywords: fermentation, equations, prediction, meta-analysis, soluble carbohydrates.

INTRODUCCIÓN

Los modelos son representaciones matemáticas de los mecanismos desconocidos o que no se controlan (Tadeschi, 2005), describen por medio de ecuaciones fenómenos biológicos (Ortega y Mendoza, 2016) y su uso se ha convertido en una herramienta de apoyo para la toma de decisiones (Tadeschi, 2019). El mismo autor indica que en la nutrición animal éstos brindan precisión en la formulación de raciones permitiendo a los animales desempeñar su potencial de producción genético. Actualmente existen diversos modelos matemáticos en la nutrición animal para el cálculo de diversas variables, sin embargo, para predecir el contenido químico y nutricional del ensilaje actualmente son pocos y específicos (Rodrigues *et al.*, 2020).

El proceso de ensilaje es un medio de conservación de granos y forrajes que consiste en la fermentación de los carbohidratos hidrosolubles en ácidos orgánicos principalmente ácido láctico en condiciones anaeróbicas que inhiben la proliferación de microorganismos (Flores *et al.*, 2014), su administración en el ganado suele constituir en muchas ocasiones la mayor parte de la dieta (Stoškus *et al.*, 2017), donde se ha observado una mayor ganancia de peso (Meenongyai *et al.*, 2017) y un aumento en la producción de leche (Wanapat *et al.*, 2018), debido a que puede aumentar los productos finales de la fermentación ruminal ya que mejora la eficacia en la utilización de nitrógeno y la síntesis de proteínas microbianas (Wanapat *et al.*, 2021).

Actualmente existen recomendaciones generales para el proceso del ensilaje como la humedad, el contenido de carbohidratos solubles y nitrógeno (Martínez *et al.*, 2018; López-Garrido *et al.*, 2014; Cobos *et al.*, 1997) pero teóricamente se podría fermentar cualquier combinación de sustratos si existen las condiciones adecuadas de humedad y proporción adecuada de carbohidratos solubles: N y eso se aprecia en reportes donde se han ensilado desde nopal (Miranda-Romero *et al.*, 2018), pez diablo (Tejada-Arroyo *et al.*, 2015), combinaciones de excretas (Martinez *et al.*, 2008, Cobos *et al.*, 1997), subproductos de panadería, rastrojo de maíz, gramíneas y granos (Bórquez *et al.*, 2009, Lanuza *et al.*, 1995), pero es necesario asegurar la calidad en el proceso cuando se

preparan ensilajes en campo al tener un modelo o sistema de estimación de la fermentación.

Justificación

La inclusión de los ensilados en las dietas de los animales es una práctica que permite la conservación de los forrajes y otros sustratos por tiempos prolongados, sin embargo, no existe un modelo matemático basado en la composición química y nutricional que permita definir fórmulas para asegurar la obtención de ensilajes con las condiciones óptimas de pH, ácido láctico y propiedades bromatológicas, además de que los equipos para medir la calidad de los ensilados son costosos y muy poco accesibles para los productores, es por esto que es necesario crear un método que permita el cálculo eficiente de la calidad del ensilado y esto se puede lograr a través de ecuaciones mecanicistas y empíricas por medio de balanceo de fracciones de carbohidratos y nitrógeno que se han usado en nutrición de rumiantes desde hace varios años para formular dietas que permiten hacer predicciones de la fermentación ruminal basado en los sistemas de PDI (INRA, 1989) y el Cornell (NRC, 2000) y este fraccionamiento basado en la disponibilidad para microorganismos ruminales puede ser la base para desarrollar el modelo para formular mezclas de ensilajes.

Hipótesis

Es factible desarrollar un modelo que permita formular ensilajes con base a elementos identificados de su composición química (humedad, proteína, proteína soluble, carbohidratos solubles) y las fracciones del sistema NRC para microorganismos ruminales.

Objetivos

General

Diseñar un modelo predictivo basado en la composición química de los forrajes antes y después del ensilaje que permita calcular las variables bromatológicas y fermentativas del ensilado.

Específicos

Identificar artículos científicos de utilidad para la elaboración de un metaanálisis.

Desarrollar un modelo matemático para determinar la calidad del ensilado.

Determinar variables que expliquen el comportamiento bioquímico del ensilado.

Evaluar las ecuaciones obtenidas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Modelos Matemáticos

La modelación es una parte central e integral del método científico, controla el entendimiento del universo, toma partes con una estructura similar para el entendimiento de problemáticas (France y Kebreab, 2008), los modelos matemáticos son representaciones aritméticas del comportamiento sistemático de fenómenos reales o inertes, permiten describir, explicar y pronosticar el futuro (Tedeschi y Menendez, 2020) a través de variables, parámetros y constantes de carácter endógeno y exógeno que participen en el funcionamiento del sistema (Ortega y Mendoza, 2016) y son indispensables para la toma de decisiones en distintas áreas del conocimiento (Hamilton, 1991), en la nutrición animal los modelos matemáticos pueden ser usados para optimizar la producción animal a través de la predicción la excreción de nitrógeno en vacas lecheras lactantes (Higgs *et al.* 2012), para estimar el aumento de peso en corderos alimentados con dietas ricas en cereales (Osorio *et al.*, 2015), el balance calórico para bovinos en pastoreo (Mendoza *et al.*, 2003), la producción de leche (NRC, 2001) y la ganancia de peso, fermentación ruminal y síntesis de proteína (NRC, 2016) entre otros, contribuyendo con la disminución del costo de experimentación y la manipulación con animales ayudando a identificar y resolver problemáticas presentes (Barghi *et al.*, 2023).

Los modelos pueden ser predictivos o descriptivos dependiendo del uso o no uso de las matemáticas respectivamente (Gurgel *et al.*, 2023)., además de que se pueden clasificar de acuerdo con el origen y naturaleza de sus variables, según Tedeschi y Menendez (2020) la clasificación más común y completa los agrupa dependiendo del tiempo en estáticos (estables) y dinámicos, se pueden subclasificar en discretos y continuos, otra clasificación depende del contexto conductual en estocásticos (probabilístico) y determinista, de acuerdo a su naturaleza los divide en empírico o mecanicista, en el contexto espacial en homogéneos y heterogéneos.

La construcción de un modelo matemático se basa en los siguientes pasos: planteamiento del problema, investigación y búsqueda de información, construcción y/o

desarrollo del modelo, evaluación y validación, finalmente el uso del modelo (Ortega y Mendoza, 2016).

La evaluación de los modelos matemáticos es un proceso objetivo que sirve para evaluar la legitimidad y en qué medida se ha cumplido lo establecido, se realiza comparando las predicciones contra las observaciones (France y Kebreab, 2008), el método más utilizado es el error cuadrático medio (ECM) y su raíz (RECM) que evalúa la precisión de la regresión lineal ajustada, utilizando la diferencia entre los valores observados y los valores predichos (Tedeschi, 2006).

La validación de los modelos se utiliza para evaluar si el modelo construido cumple su función (Hamilton, 1991) está compuesto de 3 partes importantes la verificación, análisis de sensibilidad y la evaluación. La verificación es la determinación de hasta qué punto el modelo es una representación fiel de lo que se pretendía, el análisis de sensibilidad es la determinación de la medida en que el comportamiento del modelo se ve afectado por los cambios en los parámetros, la evaluación es una comparación de la salida del modelo con las mediciones del sistema real (Hamilton, 1991).

Ensilajes

El ensilaje es una práctica rudimentaria para la conservación de los forrajes a través de un proceso fermentativo, su principal objetivo es mantener la calidad nutricional del forraje verde para satisfacer las necesidades nutrimentales de los animales (Souza *et al.*, 2022; da Silva *et al.*, 2021), su administración principalmente en rumiantes mejora la fermentación ruminal teniendo beneficios en el crecimiento y rendimiento animal, de acuerdo con Cui *et al.* (2022) altera la microbiota ruminal y regula el metabolismo de aminoácidos, carbohidratos y nucleótidos.

El proceso de la elaboración del ensilaje involucra varios aspectos que van desde la elección del forraje, los cuidados del cultivo, la edad y tipo de corte, así como la composición químico-bromatológica, higiene del silo, tiempo de cierre, compactación y sellado del silo (da Silva *et al.*, 2021), el forraje a elegir debe contar con una resistencia a la acidificación (capacidad buffer), adecuados niveles de materia seca y azúcares (Bolsen *et al.*, 1996). Actualmente cualquier tipo de cultivo puede considerarse para el ensilaje, si

se siguen las recomendaciones indicadas, incluyendo a las leguminosas a pesar de sus características químicas-bromatológicas (da Silva *et al.*, 2017; Bolsen *et al.*, 1996) ya que cuentan con una proporción baja de carbohidratos solubles en agua y una baja capacidad amortiguadora (Borreani *et al.*, 2018), es por esto por lo que es más fácil ensilar cereales por la cantidad de carbohidratos y proteína (McAllister y Hristov, 2000) .

La fermentación del ensilado es un proceso complejo, que resulta en cambios en la calidad del forraje en términos de contenido de proteínas y carbohidratos (Pit *et al.*, 1985), dando como resultado la producción de ácidos grasos volátiles, principalmente ácido láctico. Este proceso ensilado se divide en cuatro fases (Pahlow *et al.*, 2003):

1. Fase aeróbica
2. Fase de fermentación
3. Fase estable
4. Fase aeróbica o de alimentación

Fase aeróbica

La fase aeróbica comienza desde la cosecha hasta el agotamiento del oxígeno dentro del silo sólo tiene duración de unas pocas horas (Pahlow *et al.*, 2003) hay presencia de microorganismos aeróbicos obligados y facultativos (da Silva *et al.*, 2017), durante esta etapa el motor principal para la eliminación del oxígeno y la producción de calor es la respiración del forraje (Merry y Davies, 1999), en forrajes con 30 y 50% de MS las tasas de respiración son de 70 y 30% aproximadamente (Borreani *et al.*, 2018), existe una gran actividad metabólica por acción enzimática (Pettersson y Lindgren, 1990) los azúcares se convierten en CO₂, H₂O y energía con liberación de calor y por ende pérdidas de materia seca (Wang *et al.*, 2023; da Silva *et al.*, 2017), La tasa de respiración alcanza su punto máximo a los 46°C (Pitt *et al.*, 1985).

Esta fase termina cuando se utiliza todo el oxígeno (McAllister y Hristov, 2000), si el periodo de respiración se prolonga puede aumentar las pérdidas debido al desarrollo de mohos y levaduras (da Silva *et al.*, 2017).

Fase de fermentación

La fase de fermentación comienza cuando el oxígeno se ha agotado, tiene una duración que va desde una semana hasta un mes, dependiendo de las propiedades del forraje y las condiciones del ensilado (Pahlow *et al.*, 2003). Existe un aumento en la proliferación de microorganismos anaeróbicos y facultativos del origen de las enterobacterias, bacterias ácido-lácticas, clostridios, listeria, bacterias ácido-propiónicas, entre otras (Merry y Davies, 1999). Los principales grupos epifitos se enlistan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Poblaciones fúngicas y bacterianas presentes en el forraje antes del ensilado.

Grupo	Población (UFC g ⁻¹)
Bacterias aeróbicas	>10 000 000
Bacterias ácido-lácticas	10 – 1 000 000
Enterobacterias	1000 – 1 000 000
Levaduras y hongos levaduriformes	1000 – 100 000
Mohos	100 – 10 000
Clostridios (endosporas)	100 – 1000
Bacilos (endosporas)	100 – 1000
Bacterias ácido-acéticas	100 – 1000
Bacterias ácido-propiónicas	10 – 100

UFC g⁻¹ (Unidades Formadoras de colonias por gramo) (Pahlow *et al.*, 2003)

En las primeras etapas de fermentación los microorganismos anaerobios facultativos compiten por el sustrato con las bacterias ácido-lácticas, la tasa de crecimiento bacteriano se relaciona con la disminución del pH y la producción de ácido láctico (Rooke y Hatfield, 2003; Pitt *et al.* 1985).

Las bacterias de mayor relevancia en la etapa fermentativa son las bacterias ácido-lácticas presentes de forma natural en las plantas son de origen hetero y homofermentativos, reducen el pH a un rango inadecuado para la supervivencia de los organismos de descomposición (Seglar, 2003), metabolizan los carbohidratos para producir ácido láctico y ácidos orgánicos (da Silva *et al.*, 2021; Zieliński *et al.*, 2021;

Borreani *et al.*, 2018), los carbohidratos (hexosas, glucosa, sacarosa, fructosa y fructanos) se metabolizan en mayor parte dentro de los primeros 4 días por acción enzimática (Pettersson y Lindgren, 1990).

El tipo de bacterias ácido-lácticas determinará el tipo de fermentación, las bacterias homofermentativas utilizan la vía glucolítica como principal producto al ácido láctico (Hermann *et al.*, 2011) producirán 2 moléculas de ácido láctico y un mol de dióxido de carbono por mol de glucosa (McDonald *et al.*, 1991) lo que produce una pérdida del 24% de materia seca (MS) y 1% en la pérdida de energía en el ensilaje (Borreani *et al.*, 2018), mientras que las bacterias heterofermentativas son menos efectivas para reducir el pH y producirán productos finales adicionales como el ácido acético, etanol y dióxido de carbono (McAllister y Hristov, 2000; Merry y Davies, 1999), a medida que el pH desciende las bacterias homofermentativas comienzan a dominar el proceso, hasta alcanzar valores de 3.8 a 4.5 (McAllister y Hristov, 2000), por lo que la vía metabólica homofermentativa es la más eficiente ya que produce >85% de ácido láctico (da Silva *et al.*, 2017). La concentración de los productos de fermentación (Cuadro 2) en el ensilaje está determinada por la composición inicial del cultivo y por el tipo de microorganismos que se desarrollen (Buxton y O'Kiely, 2003)

Además de la producción de ácido acético y láctico se produce ácido propiónico y butírico en pequeñas cantidades. Las bacterias productoras de ácido propiónico se encuentran en bajas cantidades debido a la baja tolerancia de pH <4.8 (Merry y Davies, 1999), el descenso de pH evita el crecimiento de microorganismos de descomposición y la actividad proteolítica disminuye en el forraje ensilado a un menor pH (Sifeeldein *et al.*, 2019).

El ácido butírico es producido por clostridios presentes de forma natural en el forraje que además degradan aminoácidos y disminuye el valor nutricional del ensilado (McDonald *et al.*, 1991), la presencia de ácido butírico se asocia con aumentos en el pH >5.0 que este asociado con deterioro aeróbico (Pahlow *et al.*, 2003).

Cuadro 2. Principales vías metabólicas y sus productos durante la fermentación del ensilado.

Microorganismo	Sustrato	Vía metabólica	Producto final
Levaduras	Glucosa	Glucolisis + piruvato descarboxilasa	2 etanol + 2 CO ₂
Enterobacterias	2 Glucosas	Glucolisis + piruvato formiato liasa	2 lactato + 1 acetato + 1 etanol + 2CO ₂
Bacterias ácido- lácticas	Glucosa	Heterofermentativa Fosfogluconato/fosfocetolasa	1 lactato + 1 etanol + 1 CO ₂
Bacterias ácido- lácticas	Glucosa	Homofermentativa Glucolisis + lactato deshidrogenasa	2 lactato
Bacterias ácido- lácticas	3 Fructosas	Heterofermentativa Fosfogluconato/fosfocetolasa	1 lactato + 1 acetato + 2 manitol + 1 CO ₂
Bacterias ácido- lácticas	2 Citratos	Heterofermentativa/ homofermentativa	1 lactato + 3 acetatos +3 CO ₂
Bacterias ácido- lácticas	Malato	Heterofermentativa/ homofermentativa	1 lactato + 1 CO ₂
Clostridios	2 lactato		1 butirato +2 CO ₂ +2 H ₂

(Adaptado de Borreani *et al.*, 2018; Rooke y Hatfield, 2003).

Fase estable

La fase estable comienza cuando se agota el suministro de sustrato disponible (Wilkinson y Davies, 2013) y el ensilado ha alcanzado los niveles de pH 3.51 a 3.55 que indican una conservación adecuada de los ensilajes (Sabertanha *et al.*, 2021) e inhiben el crecimiento de microorganismos incluyendo las BAL y de descomposición, en esta etapa la calidad de los nutrientes se puede mantener indefinidamente si se preserva la anaerobiosis (McAllister y Hristov, 2000), esta fase puede comenzar a partir de las 2 a 6 semanas posteriores al ensilaje, dependiendo del tipo de sustrato (NRC, 2016).

Existe ya un ambiente ácido y sin oxígeno, la actividad de microorganismos disminuye sustancialmente y solo las enzimas tolerantes a los ácidos mantienen una

hidrolisis lenta de carbohidratos y proteínas, el forraje se puede almacenar indefinidamente si esas condiciones se mantienen por lo que las pérdidas en materia seca son mínimas (da Silva *et al.*, 2017) las bacterias ácido lácticas tienen una disminución logarítmica 3+ de su población máxima, aproximadamente de 10^{10} de UFC g^{-1} (Pahlow *et al.*, 2003), debido a la disminución de pH, los ensilajes que producen $<10g$ de CO_2 por kg de MS^{-1} y un cambio de pH de <0.5 unidades durante un periodo de 5 días se consideran estables (Wilkinson y Davies, 2012).

Las condiciones ácidas presentes en el ensilado inhiben la actividad de microorganismos indeseables, como clostridios y enterobacterias, lo que lleva a la conservación de la materia seca, nutrientes y energía (Zieliński *et al.*, 2021; Hermann *et al.* 2011) Un ensilado de calidad debe ser conservado adecuadamente y tendrá niveles óptimos de pH, ácido láctico, NH_3-N y ácidos grasos volátiles (Sabertanha *et al.*, 2021).

Mantener temperaturas constantes en el ensilado, mantiene las condiciones de pH, así como las concentraciones de ácido láctico y ácido acético ya que se mantiene la estabilidad aeróbica (Kim y Adesogan, 2006).

Fase de alimentación

La fase de alimentación comienza una vez abierto el silo y hay entrada de oxígeno (Pahlow *et al.*, 2003), lo que conlleva a un aumento en el conteo de levaduras disminuyendo los productos fermentativos en primera instancia el etanol, seguido de acético y láctico, provocando un aumento del pH y la temperatura del silo (Ferrero *et al.*, 2019), debido a que los microorganismos aerobios oxidan al ácido láctico y los ácidos de fermentación, aumentando el crecimiento de mohos, levaduras y microorganismos que afectan la calidad (Wilkinson y Davies, 2012; McAllister y Hristov, 2000), el conteo de levaduras puede aumentar cuando se alcanzan temperaturas mayores a los $35^{\circ}C$ y un pH de 5 unidades (Ferrero *et al.*, 2019).

Algunos indicadores de calidad en el ensilado al momento de su apertura es el olor debido a bajas cantidades de amoníaco (Mordenti *et al.*, 2021) y a las bajas concentraciones de ácido acético, propiónico y butírico, indicativos de una buena fermentación (Sabertanha *et al.*, 2021), el ensilaje puede permanecer estable cuando se

expone al aire durante aproximadamente 30-40 horas, dependiendo de las condiciones ambientales y características del ensilaje (da Silva *et al.*, 2017), se recomienda que se retiren al menos de 4 a 6 pulgadas diariamente del frente del silo (McAllister y Hristov, 2000) de lo contrario se estima que se pierda de 30-50 g MS/kg en un día (Pahlow *et al.*, 2003).

Los productos finales de la fermentación son importantes para mantener una buena salud en el animal, los ensilados de calidad son el resultado de una fermentación rápida y eficiente que preserva los nutrientes del cultivo (da Silva *et al.*, 2017) dando como resultado un alimento apetecible y digestible que mejora el rendimiento del animal, el ácido láctico en el rumen se convierte en propionato (NRC, 2016; McAllister y Hristov, 2000), mientras que el acetato es un producto final de la fermentación (Wilkinson y Davies, 2012).

Características Químicas de los Forrajes (Pre-ensilaje)

Un ensilado de calidad esta dado por las condiciones biológicas y químicas en el forraje que permiten un descenso del pH y una fermentación eficiente (Zieliński *et al.*, 2021), así como la etapa de madurez influye en las reacciones bioquímicas y biológicas durante el periodo de almacenamiento de la planta (Souza *et al.*, 2022), Kim y Adesogan (2006) han reportado que el tiempo de corte impacta en las concentraciones de almidón, la capacidad amortiguadora y el contenido de carbohidratos solubles.

El contenido de humedad en la planta es una de las características más importantes tomar en cuenta para una fermentación adecuada, se recomienda entre 30 y 40% de MS (300-400 g/kg MS), contenidos de MS por debajo del 25% presentan perdidas de efluentes y alta actividad de microorganismos indeseables (*Clostridium*), mientras valores por arriba del 45% presentan dificultades en el momento de empaque, resultando en una alta porosidad, lo que puede ocasionar perdidas por el desarrollo de microorganismos aerobios (da Silva *et al.*, 2017), además de que el aumento en la humedad de la planta induce a una proteólisis mayor lo que reduce el contenido de materia seca, aumentando la fermentación heteroláctica y por ende las concentraciones de ácido acético y etanol (Kim y Adesogan, 2006).

Se recomienda que los contenidos de materia seca del forraje vayan acompañados de una baja capacidad amortiguadora que está ejercida por compuestos presentes en el cultivo, como la proteína cruda, iones inorgánicos, ácidos orgánicos, entre otros (da Silva *et al.*, 2017).

El contenido adecuado de carbohidratos solubles en el forraje fresco contribuye a una caída del pH del ensilado (Sifeeldein *et al.*, 2019), se encuentran en las plantas en forma de monosacáridos (glucosa, fructosa, galactosa, arabinosa y xilosa) y oligosacáridos (sacarosa, maltosa, rafinosa y estaquiosa; Rooke y Hatfield, 2003), los más abundantes en las plantas son la glucosa, fructosa y sacarosa, son de degradación rápida y representan una fuente de energía para los microorganismos ruminales (NRC, 2016), tienen un ciclo de fluctuación diurna y sus concentraciones máximas son a las 18:00 horas y menores a las 6:00 horas (da Silva *et al.*, 2017), forrajes con altos niveles son más eficientes en la fermentación al aumentar las concentraciones de ácido láctico y disminuir el ácido acético y el etanol (Wilkinson y Davies, 2012), la cantidad recomendada de carbohidratos hidrosolubles es de 60-80 g/kg de materia seca para el proceso de ensilaje (da Silva *et al.*, 2017), después del proceso fermentativo la concentración de carbohidratos solubles se reduce (Sabertanha *et al.*, 2021).

El contenido de PC (proteína cruda) se recomienda en niveles de 70 g/kg de MS, ya que proporcionará niveles adecuados de NH₃-N para una fermentación óptima (Sabertanha *et al.*, 2021).

MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de Datos

Se realizó una búsqueda de datos en revistas científicas obtenidas de la base de datos de “Scopus” y “Web of Science” en un periodo de enero-1999 a julio-2021, con las palabras clave “fermentative quality silage” sin restricciones de idioma tomando como limitante “forages”, donde se encontraron 158 artículos. Como límites de exclusión se tomaron en cuenta el tiempo de ensilado mayor a 45 días, la ausencia de aditivos en los datos, el análisis bromatológico antes y después del proceso del ensilaje, la valoración de calidad fermentativa que incluye las variables de pH, los niveles de ácido láctico, acético, propiónico y butírico.

Todos los datos fueron forrajes del origen de las gramíneas, con un tiempo de almacenamiento que osciló entre 45-250 días. Los datos obtenidos se capturaron en una base de datos en Excel para la realización del modelo. Se capturaron 21 artículos con 51 observaciones (Figura 1).

Integración del Modelo

Captura de datos

Se capturaron en total 15 variables bromatológicas previas al ensilaje que incluyeron contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC), nitrógeno total (N), proteína degradable en rumen (PDR), proteína no degradable en rumen (PnDR), carbohidratos solubles (CS), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácido (FDA), cenizas (ASH), hemicelulosa, carbohidratos no estructurales (CNE), lignina, carbohidratos totales (CT), extracto etéreo (EE) y nutrientes totales digestibles (TDN); y 11 variables de ensilajes, 6 bromatológicas (MS, PC, FDN, FDA, ASH, EE) y 5 de características fermentativas que abarcan el contenido de ácido láctico, acético, propiónico y butírico, así como niveles de pH. Todos los datos fueron homogenizados a %MS para su análisis.

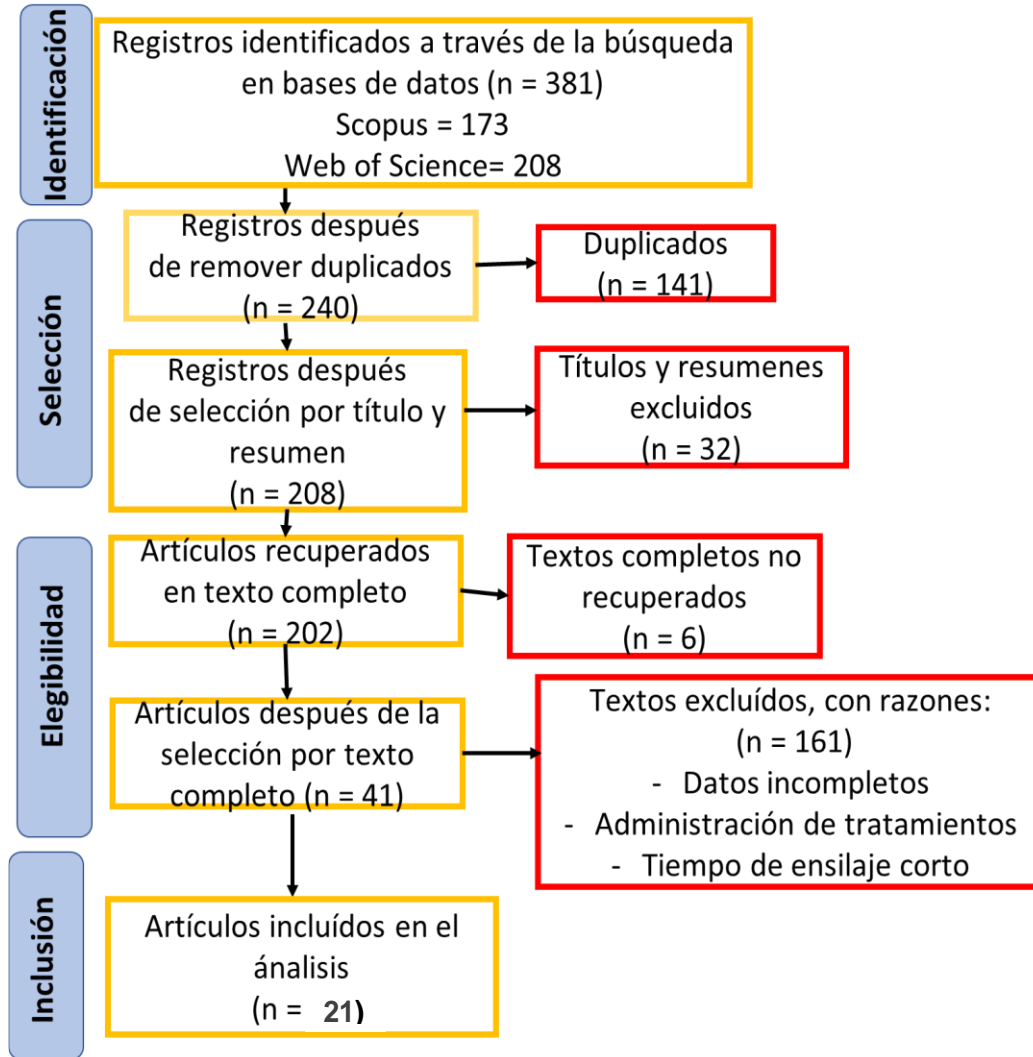


Figura 1. Selección de datos. Diagrama PRISMA adaptado de Haddaway *et al.* (2017).

Los datos faltantes fueron recabados de la literatura obtenidos de tablas de NRC (2001; 2016) y Feedpedia (2012-2021). Para las variables de nitrógeno, celulosa, hemicelulosa, carbohidratos no estructurales y carbohidratos totales se utilizaron las siguientes operaciones de NRC (2001; 2016):

$$\% \text{ Nitrogeno} = \%PC/6.25$$

$$\% \text{ Celulosa} = \%FDA - \%Lignina$$

$$\% \text{ Hemicelulosa} = \%FDN - \%FDA$$

$$\% CNE = 100 - (\%PC + \%FDN + \%EE + \%ASH)$$

$$\%CT = 100 - (\%PC + \%EE + \%ASH)$$

Desarrollo del Modelo

Se desarrolló un modelo con ecuaciones determinísticas y/o empíricas por medio de regresión múltiple, para predecir los niveles de pH, ácido láctico, acético, butírico y propiónico, así como de características bromatológicas (materia seca, proteína cruda, fibra detergente ácido, fibra detergente neutra, extracto etéreo y cenizas) del ensilaje a partir de los datos obtenidos de la recopilación de artículos científicos, en el periodo de noviembre 2021- marzo 2022.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \dots \beta_{15} X_{15}$$

La elección de variables se realizó mediante un procedimiento de CORR en SAS (SAS®Studio), se eligieron para cada variable respuesta parámetros que fueran estadísticamente significativos ($p < 0.05$), aquellas variables que presentan una correlación similar se eliminaron para evitar factores de colinealidad, de igual forma se tomaron en cuenta aquellas variables que influyeran en la respuesta de acuerdo con la literatura.

Se usó un análisis de regresión múltiple y procesos de Stepwise (SAS®Studio) para buscar variables de predicción (ecuaciones empíricas) con las variables previamente capturadas con una correlación significativa. El modelo se ajustó con los artículos de la base de datos.

Evaluación del Modelo

Validación y ajustes del modelo

Los valores observados y los predichos por el modelo serán comparados con pruebas estadísticas de t y de regresión (Osorio *et al.*, 2015), incluyendo los coeficientes de determinación (R^2), error cuadrático medio (MSE) y raíz del error cuadrático medio (RMSE).

RESULTADOS

Estadísticas Descriptivas

En el cuadro 3 se muestran las estadísticas descriptivas de las variables recabadas de los artículos y la literatura, se puede observar que la variable de carbohidratos solubles (CS) y los carbohidratos no estructurales (CNE) muestran un rango muy amplio de variabilidad, con una desviación estándar de 14.04 y 15.20 respectivamente.

Cuadro 3. Promedio, rango y desviación estándar de las variables bromatológicas de los forrajes pre-ensilaje (% MS).

Variable	Promedio	Rango	DE	No. Observaciones
MS%	28.05	11.61 – 42.27	7.62	51
PC%	7.61	1.36 – 16.99	3.42	51
NT%	1.21	0.22 – 2.72	0.54	51
PDR%	67.92	46.39 – 98.00	9.87	49
PnDR%	32.06	2.00 – 53.61	9.88	49
CS%	15.58	0.96 – 59.90	14.04	42
FDN%	54.97	11.59 – 74.80	14.03	51
FDA%	31.31	7.80 – 48.10	8.92	51
ASH%	5.75	1.60 – 13.10	3.19	48
Hemicelulosa%	23.28	3.00 – 37.90	10.02	51
CNE%	30.26	5.10 – 70.45	15.20	44
Lignina%	6.41	0.33 – 18.66	4.34	40
Carbohidratos totales %	83.73	60.70 – 94.30	6.77	51
EE %	3.43	0.97 – 17.60	3.00	48
NTD%	64.51	50.00 – 81.67	8.30	50

MS= Materia Seca, PC= Proteína Cruda, NT= Nitrógeno Total, PDR= Proteína Degradable en Rumen, PnDR= Proteína no Degradable en Rumen, CS= Carbohidratos Solubles, FDN= Fibra Detergente Neutro, FDA= Fibra Detergente Ácido, ASH= Cenizas, CNE= Carbohidratos No Estructurales, EE= Extracto Etéreo, NTD= Nutrientes Totales Digestibles. DE= Desviación estándar.

En el cuadro 4 se muestra la estadística descriptiva de la información de los ensilados de las características fermentativas y bromatológicas, se puede observar que algunas variables permanecen estables, en el caso de materia seca se observa una

disminución en el promedio de 28.05 a 27.09, mientras que los contenidos de fibras (FDN y FDA) mostraron un ligero aumento en sus valores.

Cuadro 4. Promedio, rango y desviación estándar de las variables bromatológicas y fermentativas de los ensilados (% MS).

	Promedio	Rango	DE	No. Observaciones
Variables bromatológicas				
MS%	27.09	9.45 – 43.63	7.55	51
PC%	7.19	1.54– 14.81	2.94	48
FDN%	58.03	37.00 – 77.41	12.32	50
FDA%	34.28	19.4 – 54.70	9.14	47
ASH%	4.26	1.67 – 8.33	1.82	31
CS	4.73	0.60 – 27.00	5.28	27
EE %	4.55	0.21 – 18.00	1.71	28
Variables fermentativas				
pH	3.92	3.40 – 6.03	0.46	51
Ácido láctico %	5.95	1.34 – 15.13	2.91	51
Ácido acético %	1.86	0.080– 10.00	1.69	51
Ácido propiónico %	0.16	0 – 1.6	6.81	42
Ácido butírico %	0.33	0 – 7.40	1.17	42

MS= Materia Seca, PC= Proteína Cruda, NT= Nitrógeno Total, PDR= Proteína Degradable en Rumen, PnDR= Proteína no Degradable en Rumen, CS= Carbohidratos Solubles, FDN= Fibra Detergente Neutro, FDA= Fibra Detergente Ácido, ASH= Cenizas, CNE= Carbohidratos No Estructurales, EE= Extracto Etéreo, NTD= Nutrientes Totales Digestibles. DE= Desviación estándar.

Integración de modelos

En cuadro 5 se muestran las correlaciones con las variables respuesta, se puede observar que las características bromatológicas tienen un mayor número de correlaciones significativas ($p < 0.05$) comenzando con fibra detergente neutra (FDN), seguida de proteína cruda (PC), fibra detergente ácida (FDA), extracto etéreo (EE), materia seca (MS), y cenizas con 9, 7, 6, 5, 3 y 2 correlaciones significativas ($p < 0.05$) respectivamente, en comparación con las características fermentativas donde sólo el ácido láctico presentó 4 correlaciones significativas ($p < 0.05$), mientras que el ácido butírico no presentó ninguna.

Cuadro 5. Índices de correlación de forraje fresco y ensilado.

Forraje fresco	ENSILAJES										
	MS	CP	FDN	FDA	EE	ASH	Ácido láctico	Ácido acético	Ácido propiónico	Ácido butírico	pH
MS	0.9210 <.0001*	-0.2519 0.0840	-0.398 0.0041*	-0.379 0.0085*	-0.162 0.4086	-0.065 0.7267	-0.3691 0.0077*	-0.290 0.0384*	0.0694 0.6621	-0.0035 0.9825	-0.0803 0.5753
CP	-0.1005 0.4829	0.9154 <.0001*	-0.144 0.3158	-0.215 0.147	0.382 0.0443*	-0.2890 0.1148	0.4842 0.0003*	0.3088 0.0274*	-0.1187 0.4537	0.0762 0.6400	0.3622 0.0090*
NT	-0.1005 0.4828	0.9154 <.0001*	-0.1439 0.3187	-0.215 0.147	0.385 0.0426*	-0.2890 0.1148	0.4847 0.0003*	0.3100 0.0268*	-0.1172 0.4595	0.0778 0.6331	0.3628 0.0089*
PDR	-0.0407 0.7810	-0.1065 0.4809	0.0319 0.8293	-0.050 0.744	-0.30481 0.1308	-0.2038 0.2888	0.2333 0.1061	0.0494 0.7357	0.3043 0.0530*	-0.1742 0.2887	0.0090 0.9510
PnDR	-0.0408 0.7803	0.1049 0.4876	-0.0317 0.8302	0.050 0.744	0.3048 0.1300	0.2031 0.2906	-0.2333 0.1066	-0.0522 0.7216	0.3263 0.0683	0.1741 0.2891	-0.0121 0.934
CS	-0.1985 0.2075	-0.7300 <.0001*	0.1784 0.2771	0.502 0.0015*	-0.35481 0.1248	-0.0817 0.7175	-0.4510 0.0027*	0.0430 0.7949	-0.0957 0.5463	-0.1994 0.2997	-0.1427 0.3859
FDN	-0.1453 0.3090	0.1345 0.3618	0.7115 <.0001*	0.393 0.0063*	-0.1749 0.3731	0.2284 0.2163	0.0002 0.9988	0.1517 0.2877	-0.1900 0.2280	0.1694 0.2959	0.23022 0.1041
FDA	-0.3262 0.0195*	0.1011 0.4941	0.5380 <.0001*	0.730 <.0001*	0.157 0.4239	-0.0085 0.9638	-0.1637 0.2509	0.1842 0.1955	-0.0492 0.7658	0.0347 0.8315	0.2621 0.0631
ASH	-0.1684 0.2525	0.3884 0.0084*	-0.0919 0.5389	-0.023 0.880	0.39174 0.036*	0.6111 0.0003*	0.1332 0.3665	0.0241 0.8703	-0.1900 0.2280	0.2403 0.1460	0.1232 0.4040
HEM	0.1073 0.4534	0.1630 0.2681	0.4964 0.0002	-0.099 0.5069	-0.288 0.136	0.2594 0.1587	0.1800 0.2061	0.0784 0.5842	-0.0492 0.7658	0.2036 0.2076	0.0652 0.6491
CNE	0.1909 0.2143	-0.4286 0.0052*	-0.4278 0.0042*	-0.268 0.0943	0.114 0.699	-0.2541 0.1754	-0.0632 0.6831	-0.1694 0.2714	0.0374 0.8141	-0.1540 0.3770	-0.4129 0.0053*
LIG	-0.1258 0.4391	-0.1547 0.3469	0.3989 0.0108*	0.546 0.0005*	0.114 0.6399	0.0026 0.9909	-0.2843 0.0754	-0.0714 0.6613	-0.0311 0.8679	-0.1143 0.5473	-0.1310 0.4201
CT	0.0905 0.5273	-0.7230 <.0001*	0.3550 0.0114*	0.131 0.3766	-0.8000 <.0001*	-0.1169 0.5461	-0.2274 0.1085	-0.1206 0.3991	0.0906 0.5682	0.1161 0.4754	-0.3554 0.0105*
EE	-0.111 0.4511	0.3736 0.0115*	-0.3703 0.0104*	-0.047 0.7584	0.988 <.0001*	-0.0260 0.8892	0.0660 0.6557	-0.0330 0.8235	-0.1118 0.4977	0.0864 0.6057	0.2116 0.1487
NTD	0.5515 <.0001*	0.0289 0.8733	-0.759 <.0001*	-0.395 0.0066*	-0.053 0.7867	-0.5328 0.0020*	-0.1721 0.2320	-0.2982 0.0354*	-0.1055 0.5114	-0.1879 0.2520	-0.1147 0.4273

MS= Materia Seca, CP= Proteína Cruda, NT= Nitrógeno Total, PDR= Proteína Degradable en Rumen, PnDR=Proteína no Degradable en Rumen, CS= Carbohidratos Solubles, FDN= Fibra Detergente Neutro, FDA= Fibra Detergente Ácida, ASH= Cenizas, HEM= Hemicelulosa, CNE= Carbohidratos No Estructurales, LIG= Lignina, CT= Carbohidratos Totales, EE= Extracto Etéreo, NTD= Nutrientes Totales Digestibles. *Correlaciones significativas (p<0.05).

Desarrollo del Modelo

Se obtuvieron en total 29 ecuaciones predictoras, 17 para variables bromatológicas y 12 para variables fermentativas, el parámetro que más reincidió fueron los carbohidratos solubles presentes en 13 ecuaciones, seguida de nutrientes totales digestibles y materia seca en 12 ecuaciones cada una, no existió ninguna variable de las 15 capturadas que no apareciera en alguna ecuación, sin embargo, las de menor prevalencia fueron PnDR y Hemicelulosa en sólo una ecuación cada una. Las ecuaciones fermentativas tuvieron un menor coeficiente de determinación en comparación con las variables bromatológicas, con un R^2 0.73 para ácido propiónico y 0.97 para extracto etéreo, con una raíz del error cuadrático medio (ECM= 0.02 y 0.34 respectivamente) y un error cuadrático medio menor (RECM= 0.15 y 0.58 respectivamente) indicando una menor variabilidad de los datos.

Variabes bromatológicas

En el cuadro 6 se observa las ecuaciones obtenidas a través del proceso de Stepwise con 27 observaciones para determinar materia seca, en ambas ecuaciones se incluye el contenido de materia seca y carbohidratos solubles con un coeficiente de determinación alto (0.92 y 0.90), con un ajuste mayor al modelo en la ecuación 1 (RECM=1.97) con respecto a la ecuación 2 (RECM= 2.10), en ambas ecuaciones se encuentra la presencia de materia seca y carbohidratos solubles, en la figura 2 se puede observar dicha dispersión de los datos de cada ecuación y la cercanía que se tiene a los límites de confianza ($p < 0.05$).

Cuadro 6. Ecuaciones predictoras de Materia Seca (Valores en %MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor <i>p</i>
1	$\%MS = 10.64 + (0.78 * MS) - (2.05 * NT) - (0.20 * CS)$	0.92	3.88	1.97	<.0001
2	$\%MS = -2.15 + (0.77 * MS) - (0.18 * CS) + (0.12 * CT)$	0.90	4.42	2.10	<.0001

MS= Materia Seca, NT= Nitrógeno Total, CS= Carbohidratos Solubles, CT= Carbohidratos Totales. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

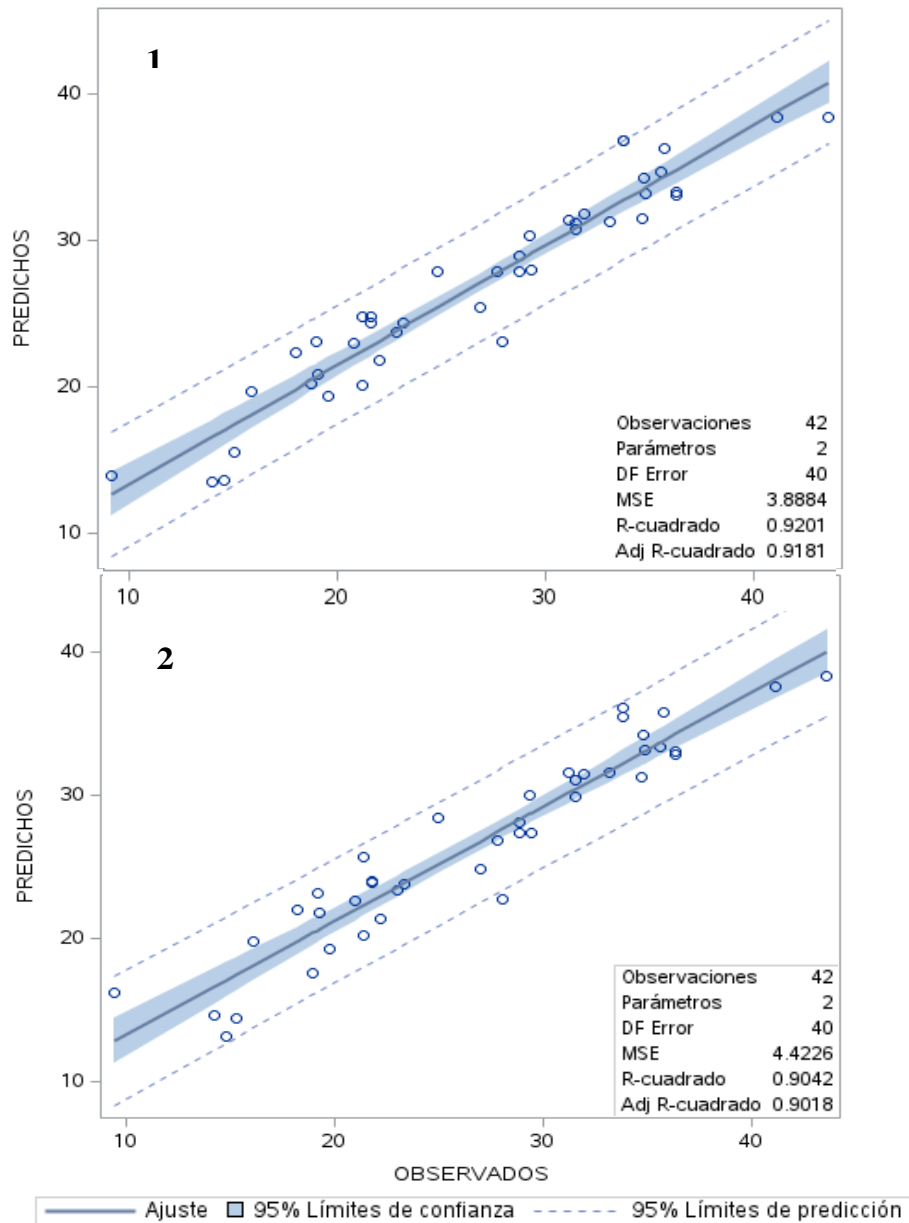


Figura 2. Gráfico de ajuste Observados VS Predichos %MS. (ECM = Error Cuadrático Medio).

En el cuadro 7 se presentan las ecuaciones de contenido de proteína cruda, su predicción solo incluyó pocas variables a pesar de contar con 7 correlaciones significativas. Las ecuaciones se realizaron con 47 observaciones en las que se muestra la presencia de sólo 4 variables, los coeficientes de determinación son estadísticamente significativos ($R^2 = 0.85$ y 0.86), los ajustes son similares estadísticamente. En la figura 3

se puede observar el gráfico de ajuste con una dispersión de los datos obtenidos contra los predichos muy similar.

Cuadro 7. Ecuaciones predictoras de Proteína Cruda (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor <i>p</i>
1	$PC \% = 0.83 + (0.70 * PC) + (0.25 * ASH) - (0.013 * CNE)$	0.86	1.03	1.01	<.0001
2	$PC \% = 0.15 + (0.71 * PC) + (0.27 * ASH)$	0.85	0.97	0.98	<.0001
3	$PC \% = 0.16 + (4.44 * NT) + (0.27 * ASH)$	0.85	0.98	0.99	<.0001

PC= Proteína Cruda, NT= Nitrógeno Total, CNE= Carbohidratos No Estructurales, ASH, Cenizas. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, (*p*<0.05).

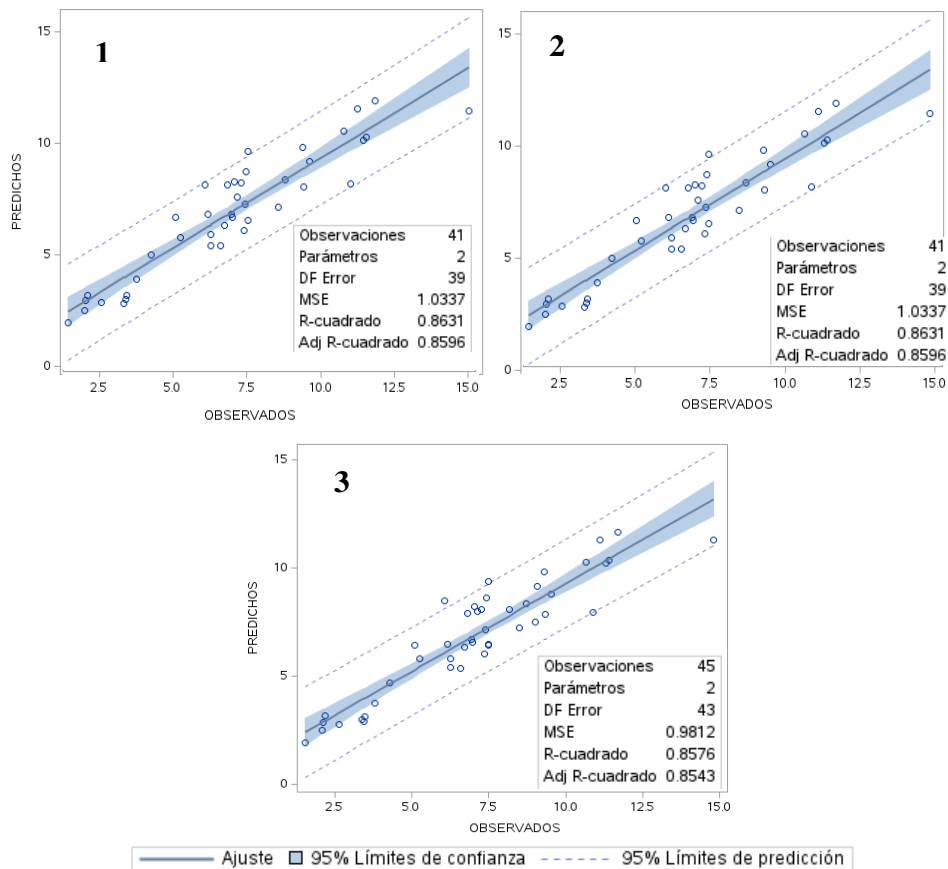


Figura 3. Gráfico de ajuste, observados VS predichos %PC. (ECM = Error Cuadrático Medio).

En el cuadro 8 se presentan las 4 ecuaciones predictoras para fibra detergente neutra, es la variable bromatológica con más ecuaciones y número de variables. La ecuación número 3 presenta 8 variables con un coeficiente de determinación mayor ($R^2=0.87$), sin embargo, la raíz del error cuadrado medio es alta (4.36). Las 4 ecuaciones presentan CT y NTD, en 3 de ellas una de las variables se encuentra al cuadrado. En la figura 4 se muestra el gráfico de ajuste de observados contra predichos, se puede observar que en cada gráfico se utilizó un diferente número de observaciones, la dispersión de los datos es mayor en la ecuación 1, los límites de predicción y el área es mayor.

Cuadro 8. Ecuaciones predictoras de Fibra Detergente Neutra (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$FDN \% = 86.21 + (0.18 * CS) + (0.46 * CT) - (1.14 * NTD)$	0.69	42.54	6.52	<.0001
2	$FDN \% = 71.28 + (0.02 * LIG^2) + (0.64 * CT) - (1.09 * NTD)$	0.74	33.80	5.81	<.0001
3	$FDN \% = -6.40 - (0.38 * MS) + (FDN) - (0.18 * FDA) + (0.010 * CNE^2) + (0.39 * LIG) + (0.54 * CT) + (1.29 * EE) - (0.60 * NTD)$	0.87	19.06	4.36	<.0001
4	$FDN\% = 1.34 - (0.37 * MS) + (FDN) + (0.010 * CNE^2) + (0.49 * CT) + (1.27 * EE) - (0.70 * NTD)$	0.76	34.78	5.89	<.0001

CS= Carbohidratos Solubles, CT= Carbohidratos Totales, NTD= Nutrientes Totales Digestibles, LIG= Lignina, CNE= Carbohidratos No Estructurales, EE= Extracto Etéreo, MS= Materia Seca, FDN= Fibra Detergente Neutra. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p<0.05$).

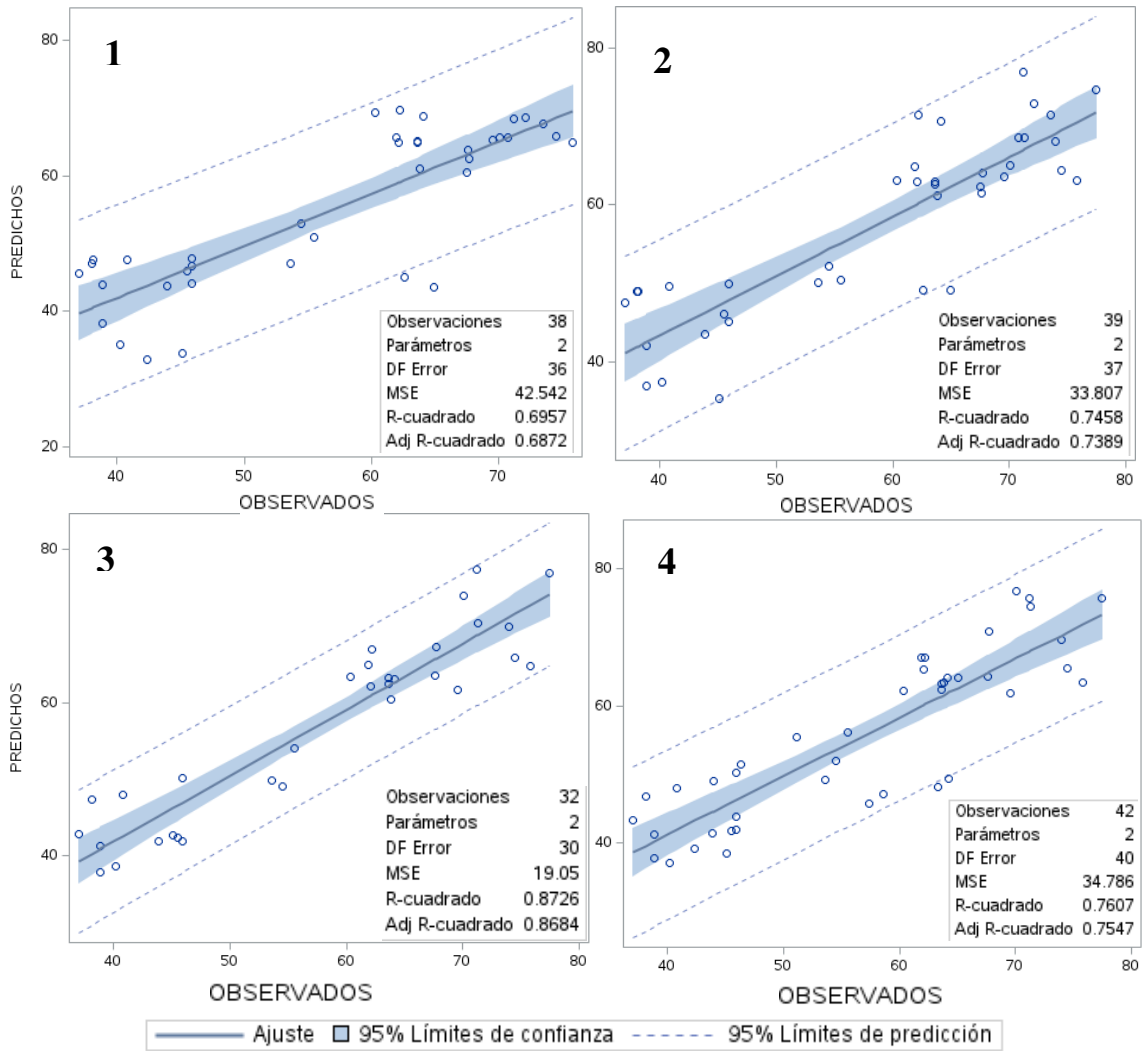


Figura 4. Gráfico de ajuste, Observados VS Predichos %FDN. (ECM = Error Cuadrático Medio).

Las ecuaciones obtenidas para el contenido de fibra detergente ácida se muestran en el cuadro 9, se utilizaron 25 observaciones para su modelación, las 3 ecuaciones presentan índices de correlación similares y entre las variables se encuentran CS, FDA y LIG, en la figura 5 se muestra el gráfico de ajuste donde la dispersión de los datos es menor en la ecuación 2 con una raíz del error cuadrático medio menor (3.93).

Cuadro 9. Ecuaciones predictoras de Fibra Detergente Ácido (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$\%FDA = 5.71 + (0.31 * CS) + (0.58 * FDA) + (0.82 * LIG)$	0.72	19.95	4.46	<.0001
2	$\%FDA = 14.45 + (0.31 + CS) + (0.57 * FDA) + (0.68 * LIG) - (0.11 * NTD)$	0.78	15.47	3.93	<.0001
3	$\%FDA = 5.58 + (0.331 * CS) + (0.60 * FDA) + (0.74 * LIG)$	0.73	18.95	4.35	<.0001

CS= Carbohidratos Solubles, FDA= Fibra Detergente Ácido, LIG= Lignina, NTD= Nutrientes Totales Digestibles. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, (p<0.05).

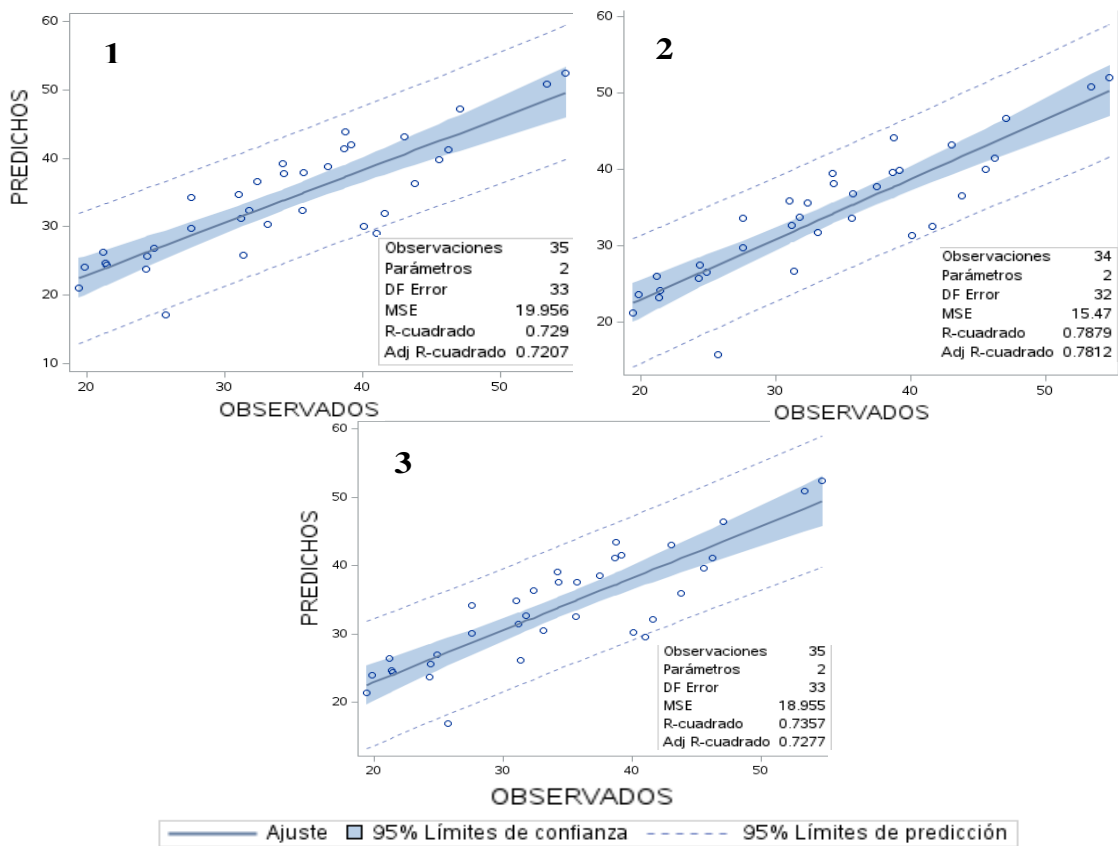


Figura 5. Gráfico de ajuste, Observados VS Predichos %FDA. (ECM = Error Cuadrático Medio).

Los mayores coeficientes de determinación los obtuvieron las ecuaciones de extracto etéreo presentes en el cuadro 10, para su modelación se utilizaron 28 observaciones, de acuerdo a la estadística descriptiva éstos aumentaron de 3.43 a 4.55 después del proceso de ensilaje, mostrando un aumento lineal, en la ecuación número 1 sólo se utilizó el contenido de extracto etéreo previo al ensilaje, mientras que en las ecuaciones 2 y 3 se usaron fracciones de carbohidratos y proteína cruda, la raíz del error cuadrático medio fue casi idéntico en las 3 ecuaciones (ECM=0.58 y 0.57) que se ve reflejado en la dispersión de los datos de la figura 6.

Cuadro 10. Ecuaciones predictoras de Extracto Etéreo (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$\%EE = 0.105 + (1.04 * EE)$	0.97	0.34	0.58	<.0001
2	$\%EE = 103.95 - (1.02 * PC) - (1.03 * ASH) - (1.03 * CT)$	0.97	0.33	0.58	<.0001
3	$\%EE = -0.25 + (0.014 * HEM) + (1.05 * EE)$	0.97	0.32	0.57	<.0001

EE= Extracto Etéreo, PC=Proteína Cruda, ASH= Cenizas, CT=Carbohidratos Totales, HEM= Hemicelulosa. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

Las 2 ecuaciones obtenidas para contenido de cenizas presentes en el cuadro 11, se modelaron a través de 17 observaciones, obtuvieron un coeficiente de determinación de 0.82 y 0.60, sin embargo, la raíz del error cuadrático medio fue muy similar (0.82 y 0.85 respectivamente) con un mayor número de observaciones en la gráfica de ajuste de la figura 7, donde se muestra una menor dispersión de los datos. En ambas ecuaciones están presentes el contenido de cenizas y nutrientes totales digestibles.

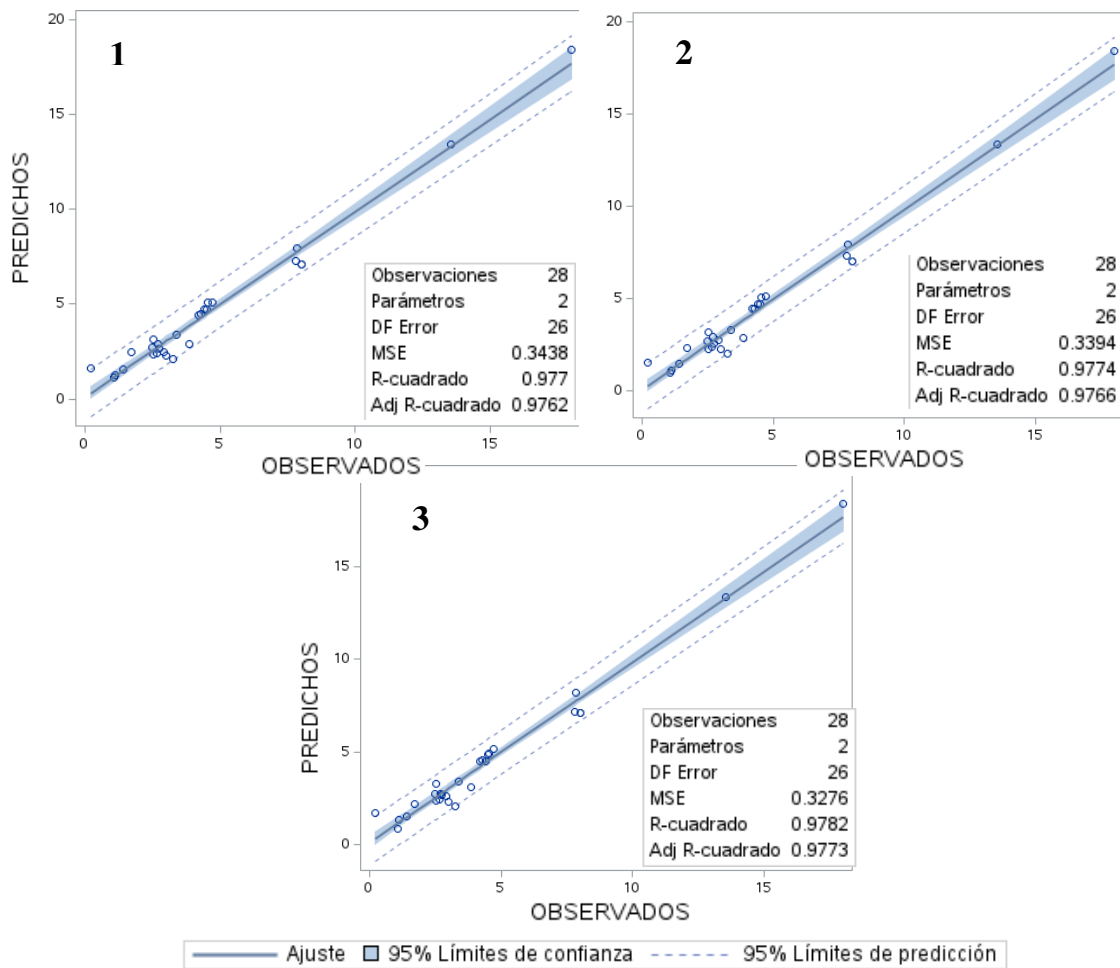


Figura 6 Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos %EE. (ECM = Error Cuadrático Medio).

Cuadro 11. Ecuaciones predictoras para contenido de cenizas (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$\%ASH = 5.07 + (0.028 * CS) + (0.71 * ASH) - (0.066 * NTD)$	0.82	0.70	0.83	<.0001
2	$\%ASH = 6.46 + (0.35 * ASH) - (0.06 * NTD)$	0.60	0.72	0.85	<.0001

CS= Carbohidratos Solubles ASH= Cenizas, NTD= Nutrientes Totales Digestibles. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

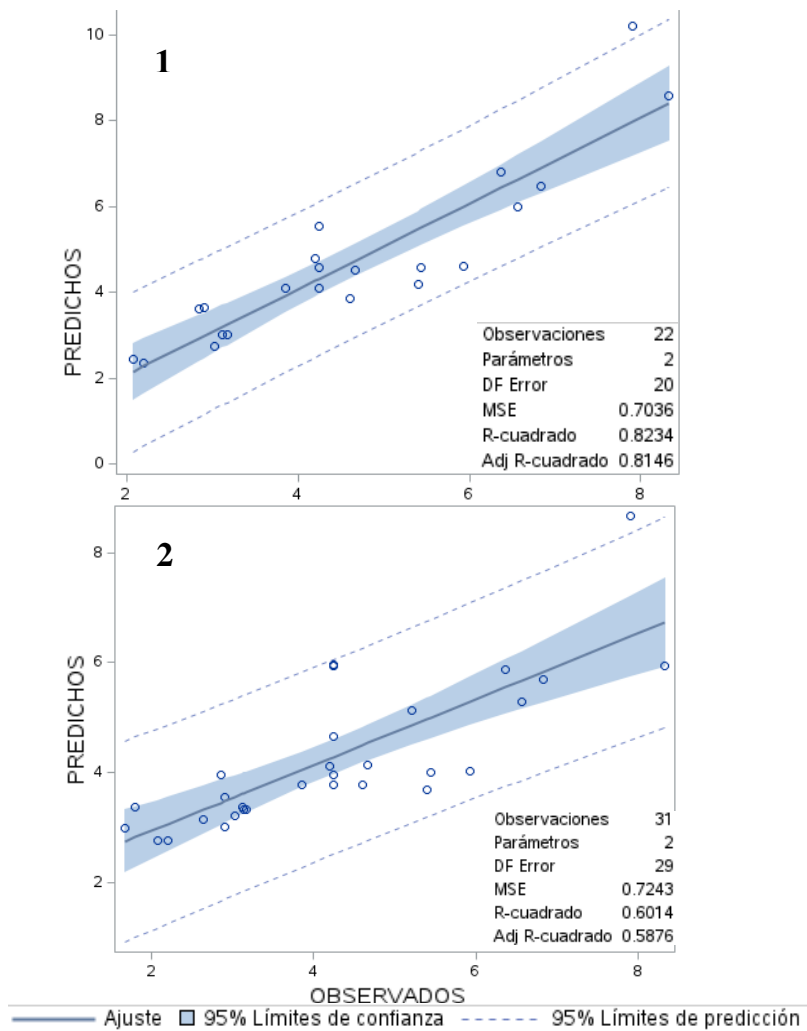


Figura 7 Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos %CENIZAS. (ECM = Error Cuadrático Medio).

Variables fermentativas

Las ecuaciones obtenidas para predecir pH fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$), como se puede observar en el cuadro 12, ambas ecuaciones presentan al contenido de proteína cruda como variable significativa. El índice de determinación es mayor en la ecuación 1 ($R^2 = 0.62$) con respecto a la ecuación 2 ($R^2 = 0.18$), sin embargo, la segunda ecuación presenta un error cuadrático medio menor que se puede observar en la dispersión de los datos en la figura 8 pero cuenta con un área mayor en los límites de confianza.

Cuadro 12. Ecuaciones predictoras para pH (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor <i>p</i>
1	$pH = 3.04 + (0.018 * MS) + (0.11 * PC) + (0.023 * CS) - (0.025 * CNE)$	0.62	0.075	0.27	<0.0001
2	$pH = 3.00 + (0.036 * PC) + (0.015 * FDA)$	0.18	0.056	0.23	0.0015

MS= Materia Seca, PC= Proteína Cruda, CS= Carbohidratos Solubles, CNE= Carbohidratos No Estructurales, FDA=Fibra Detergente Ácida. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, (*p*<0.05).

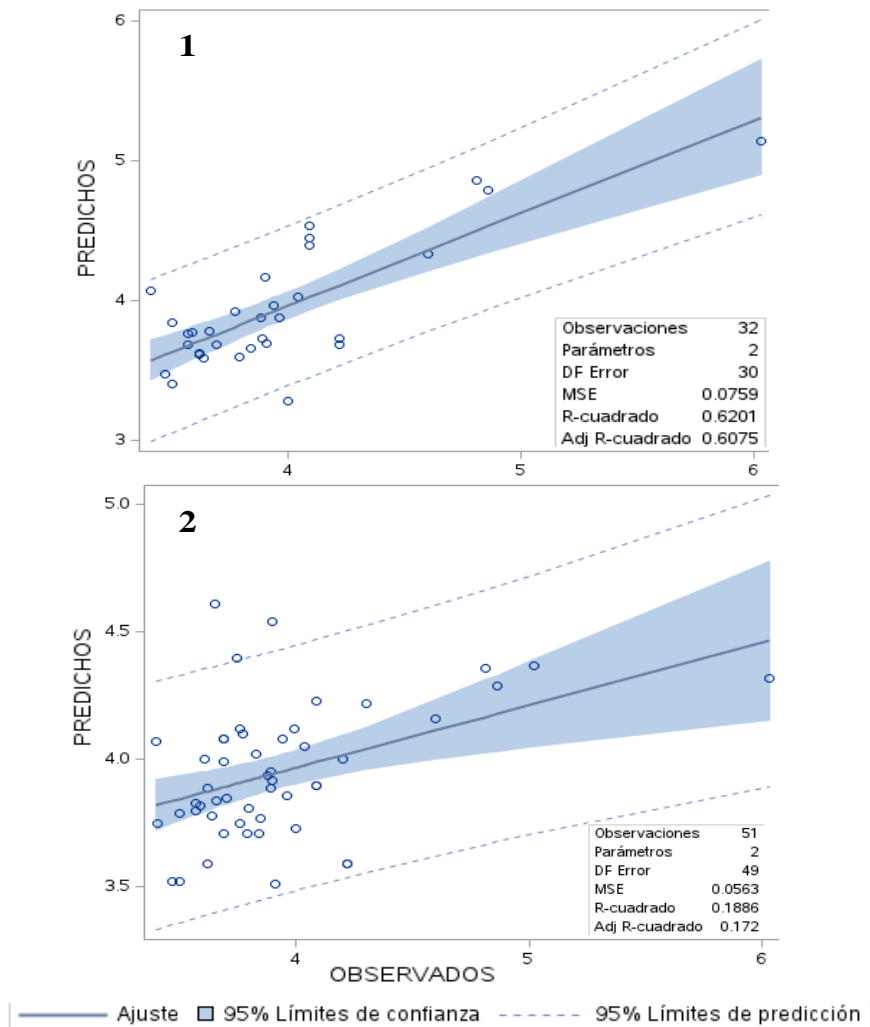


Figura 8. Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos pH. (ECM = Error Cuadrático Medio).

Se obtuvieron 4 diferentes ecuaciones a partir de 27 observaciones para la predicción de ácido láctico (cuadro 13), se puede observar la presencia de materia seca y carbohidratos solubles en todas las ecuaciones, todas las ecuaciones obtuvieron un diferente índice de determinación similar, el mayor fue de 0.59 perteneciente a la ecuación 1, sin embargo, el error cuadrático medio fue muy similar, siendo menor en la ecuación número 3 (ECM=2.21), todas las ecuaciones fueron estadísticamente significativas ($p<0.05$). Los gráficos de ajuste se pueden observar en la figura 9, en el gráfico correspondiente a ecuación número 1 se refleja una dispersión menor de los datos.

Cuadro 13. Ecuaciones predictoras de contenido de Ácido Láctico (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$\begin{aligned} \text{Ác. Lac \%MS} = & 0.42 - (-0.20 * MS) \\ & + (1.66 * NT) \\ & + (0.08 * PDR) \\ & - (0.07 * CS) \\ & - (0.08 * FDA) + (0.09 \\ & * CT) \end{aligned}$	0.59	2.23	1.49	<0.0001
2	$\begin{aligned} \text{Ác. Lac \%MS} = & 4.6 - (0.17 * MS) \\ & + (0.12 * PDR) - (0.11 \\ & * CS) \end{aligned}$	0.53	2.36	1.53	<0.0001
3	$\begin{aligned} \text{Ác. Lac \%MS} = & 1015 - (0.20 * MS) \\ & + (0.09 * PDR) \\ & - (0.10 * CS) - (0.08 \\ & * FDA) \end{aligned}$	0.57	2.21	1.48	<0.0001
4	$\begin{aligned} \text{Ác. Lac \%MS} = & 7.59 - (0.21 * MS) \\ & + (1.81 * NT) - (0.06 * CS) \\ & - (0.12 * FDA) + (0.08 \\ & * CT) \end{aligned}$	0.53	2.49	1.57	<0.0001

MS= Materia Seca, NT= Nitrógeno Total, PDR= Proteína Degradable en Rumen, CS= Carbohidratos Solubles, FDA= Fibra Detergente Ácido, CT=Carbohidratos Totales. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p<0.05$).

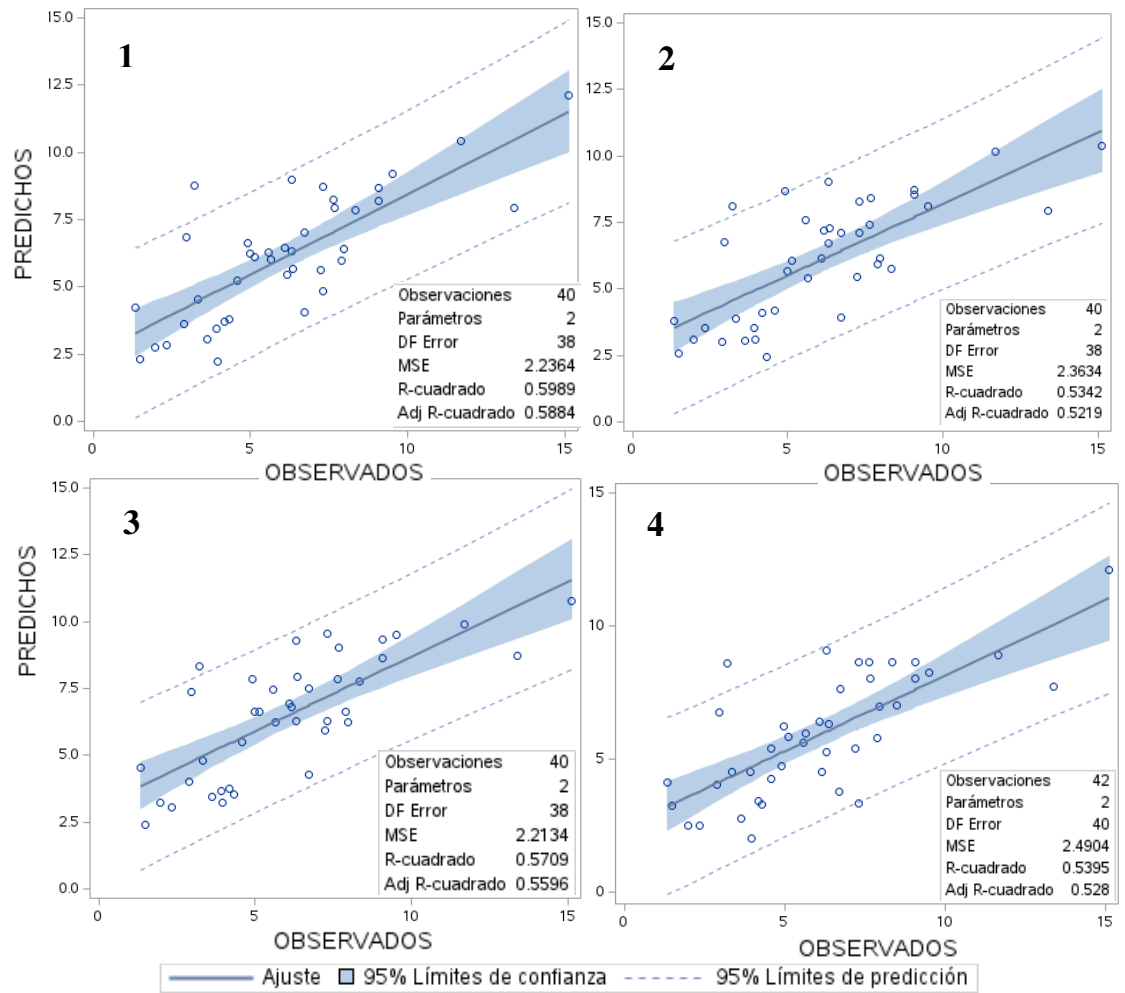


Figura 9. Gráficos de ajuste. Observados VS Predichos, contenido de Ácido Láctico (%MS). (ECM = Error Cuadrático Medio).

Cuadro 14. Ecuaciones predictoras para el contenido de Ácido Acético (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor <i>p</i>
1	Ác. Acético \%MS $= 4.75 + (0.15 * PC) - (0.06 * NTD)$	0.19	0.43	0.68	0.0015
2	Ác. Acético \%MS $= 5.29 + (0.95 * NT) - (0.07 * NTD)$	0.19	0.49	0.70	0.0015
3	Ác. Acético \%MS $= 9.15 + (1.10 * NT)$ $- (0.04 + FDN)$ $+ (0.03 * FDA) - (0.11 * NTD)$	0.22	0.62	0.79	0.0005

PC= Proteína Cruda, NTD= Nutrientes Totales Digestibles, NT=Nitrógeno total=Fibra Detergente Neutra, FDA= Fibra Detergente Ácido. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

Las ecuaciones predictoras para ácido acético se muestran en el cuadro 14, se realizaron a partir de 27 observaciones, se puede observar que cuentan con un coeficiente de determinación bajo (0.22 y 0.19), sin embargo, las 3 ecuaciones son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), los errores cuadráticos medios son bajos, el menor se presentó en la ecuación 1 (0.43) con sólo 2 variables (PC y NTD). En las 3 ecuaciones se puede observar la presencia de fragmentos de proteína y sólo en la ecuación número 3 variables relacionadas con los carbohidratos.

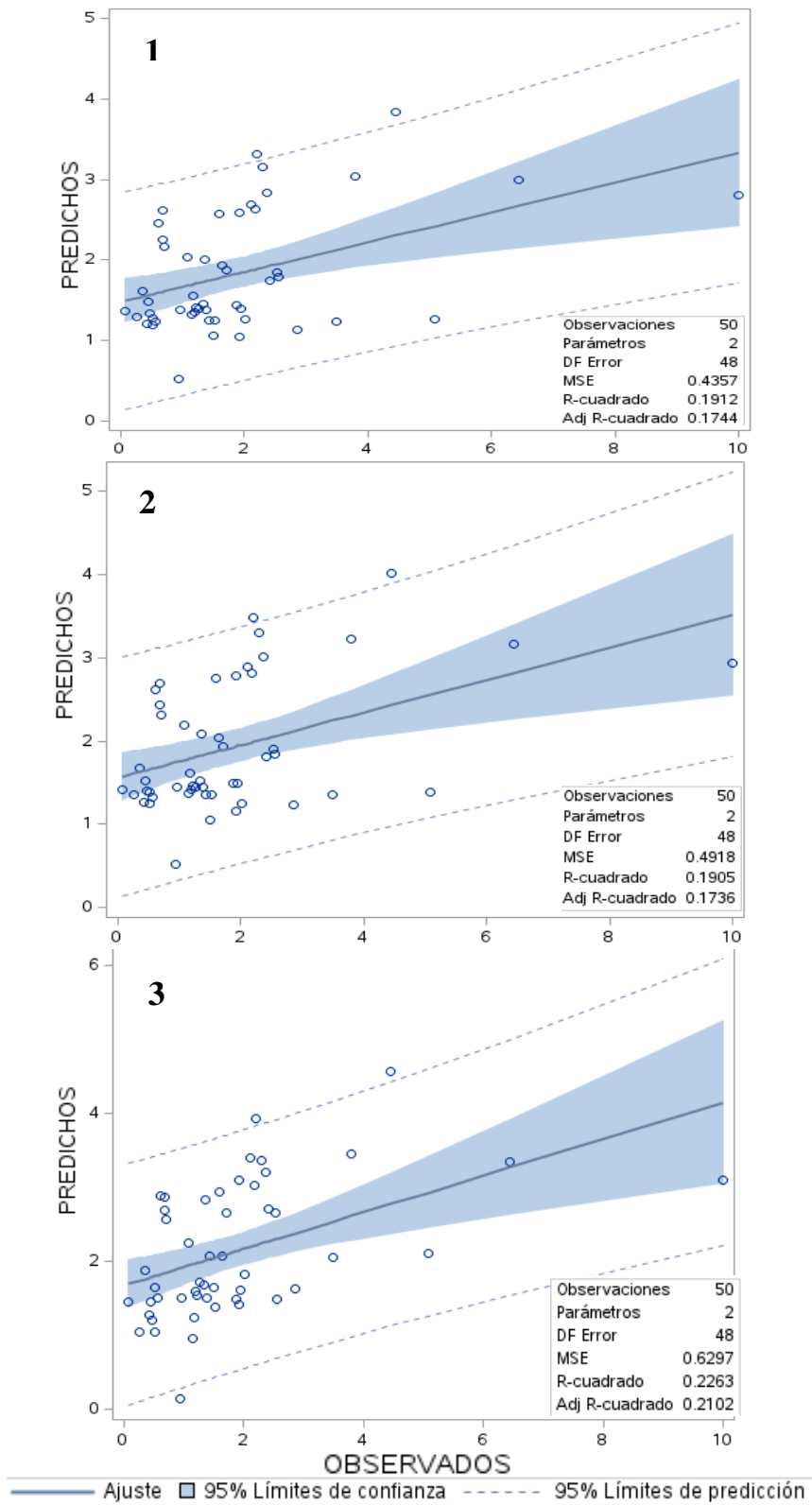


Figura 10. Gráficos de ajuste. Observados VS Predichos, contenido de Ácido Acético (%MS). (ECM = Error Cuadrático Medio).

En el cuadro 15 se presentan las ecuaciones predictoras para ácido propiónico obtenidas a partir de 22 observaciones, ambas ecuaciones son estadísticamente significativas ($p < 0.05$), muestran índices de determinación muy diferentes, la ecuación 1 con sólo 4 variables cuenta con un $R^2 = 0.22$, mientras la ecuación 2 con un $R^2 = 0.73$ pero presenta 7 variables, en ambas ecuaciones las variables presentes son MS, PDR, FDN y NTD. El gráfico de ajuste se puede observar en la figura 11, la dispersión de los datos es mayor en el gráfico 1, donde el número de observaciones es mayor con respecto al gráfico 2.

Cuadro 15. Ecuaciones predictoras para Ácido Propiónico (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	<p>Ác. Propiónico %MS</p> $= 2.38 + (0.012 * MS)$ $+ (0.029 * PDR)$ $- (0.027 * FDN) - (0.048 * NTD)$	0.22	0.16	0.40	0.0022
2	<p>Ác. Propiónico %MS</p> $= 3.28 + (0.016 * MS)$ $+ (0.029 * PDR)$ $+ (0.008 * CS)$ $- (0.038 * FDN)$ $- (0.014 * CNE)$ $- (0.018 * LIG) - (0.050 * NTD)$	0.73	0.02	0.15	<.0001

MS= Materia Seca, PDR= Proteína Degradable en Rumen, FDN=Fibra Detergente Neutro, NTD= Nutrientes Totales Digestibles, CS= Carbohidratos Solubles, CNE=Carbohidratos No Estructurales, LIG= Lignina. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

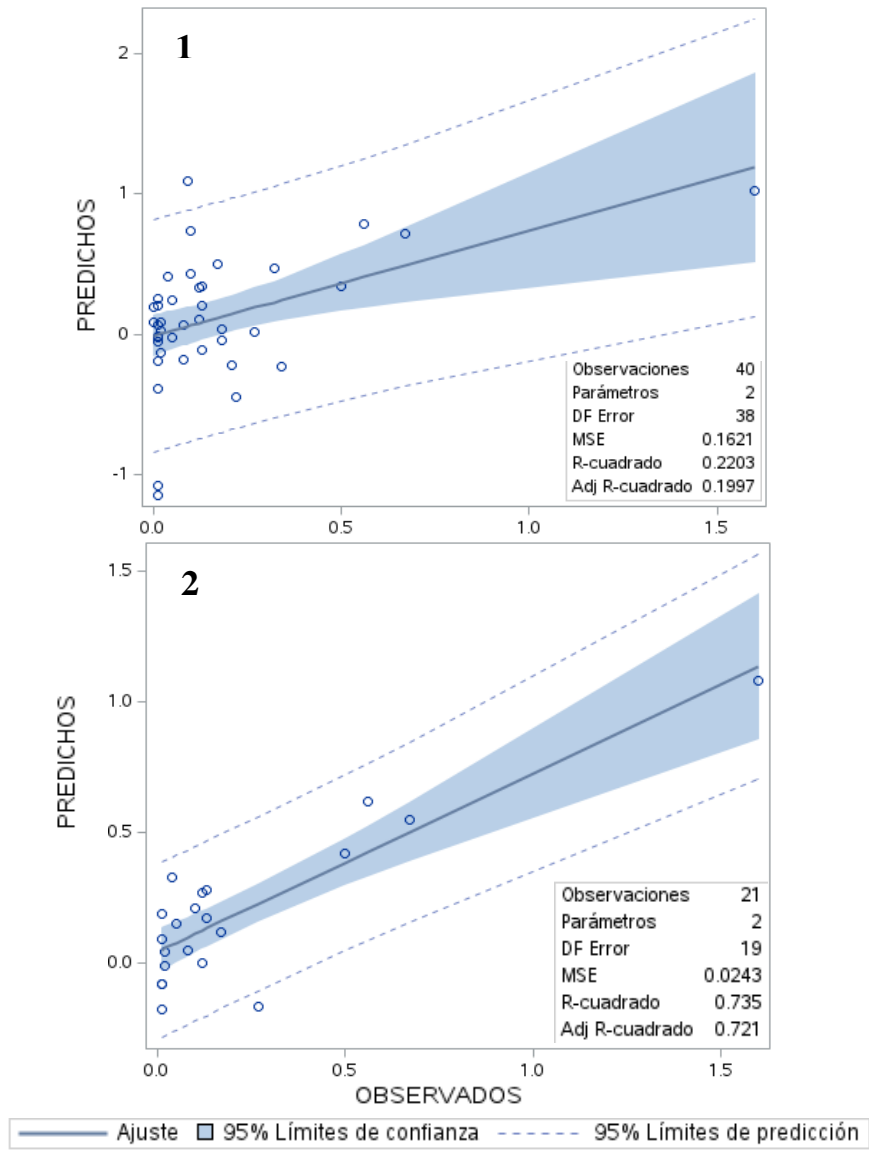


Figura 11. Gráfico de ajuste. Observados VS Predichos, Ácido propiónico (%MS). (ECM= Error Cuadrático Medio).

Cuadro 16. Ecuaciones predictoras para Ácido Butírico (%MS).

No.	Ecuación	R ²	ECM	RECM	Valor p
1	$\begin{aligned} \text{Ác. Butírico \%MS} \\ = -7.878 + (0.19 * MS) \\ + (0.05 * FDA) + (0.27 \\ * ASH) \end{aligned}$	0.22	1.49	1.22	0.0028

MS= Materia Seca, FDA= Fibra Detergente Ácida, ASH= Cenizas. R²= Coeficiente de correlación, ECM = Error Cuadrático Medio, RECM= Raíz del Error Cuadrático Medio, ($p < 0.05$).

Para la predicción de ácido butírico sólo se obtuvo 1 ecuación a partir de 20 observaciones, sólo cuenta con 3 variables y presenta un índice de determinación bajo ($R^2=0.22$), es estadísticamente significativa, y la dispersión de los datos mostrada en la figura 12, muestra un área amplia en los límites de predicción.

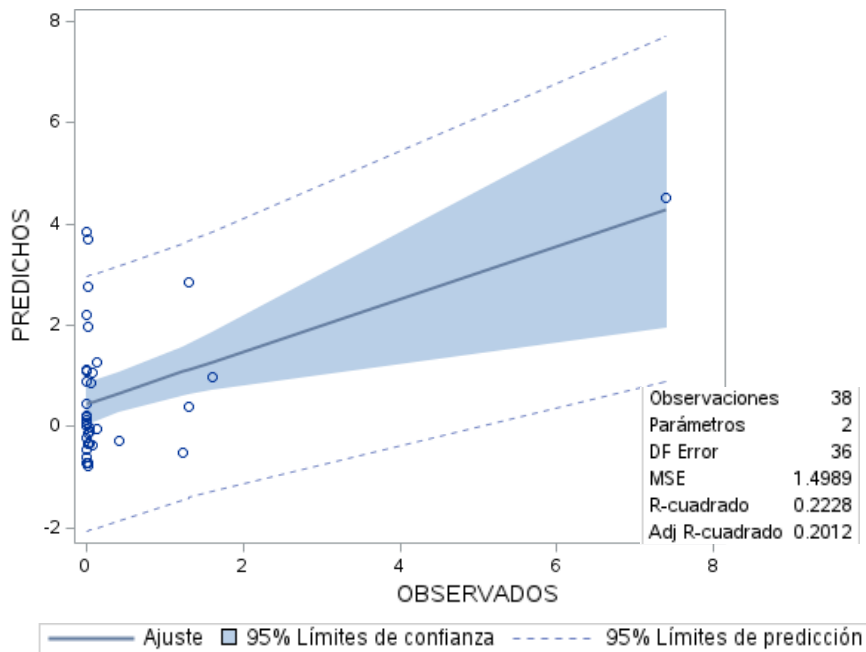


Figura 12. Gráfico de ajuste. Observado VS Predicho, Ácido Butírico (%MS). (ECM = Error Cuadrático Medio).

DISCUSIÓN

Variables Bromatológicas

El valor nutricional y los productos de fermentación se vieron influenciados en gran parte por el contenido de materia seca, carbohidratos solubles y nutrientes totales digestibles. El contenido de materia seca estuvo presente en 12 ecuaciones de las 29 obtenidas, por lo que se considera una variable de gran importancia. Datos que concuerdan con Kasmaei *et al.* (2013) donde el contenido de materia seca estuvo presente en sus ecuaciones para parámetros fermentativos. Existen múltiples estudios que hablan de la relación de la materia seca con el contenido de AGV y su relación con la estabilidad aeróbica (Sharif *et al.*, 2023; Souza *et al.*, 2022; Weinberg *et al.*, 2008), debido a que existe un efecto directo con el intercambio de oxígeno durante la primera etapa fermentativa, afectando parámetros de temperatura y reproducción de bacterias epifitas, se ha demostrado que a un mayor contenido de materia seca la tasa de respiración disminuye, de acuerdo, con datos proporcionados por Weinberg *et al.* (2008). En el forraje el contenido de materia seca se ve afectado por la etapa de corte del forraje (Souza *et al.*, 2022), Yin *et al.* (2023) menciona que la pérdida de MS y nutrientes aumentan en el ensilado conforme aumenta la edad de la planta debido a la degradación que existe durante la fermentación.

La proteína cruda y el contenido de nitrógeno mostró correlaciones similares para los parámetros estimados, teniendo efectos de colinealidad, por lo que se decidió eliminar una de estas variables durante el proceso de Stepwise. Yin *et al.*, (2023), demostró que estas fracciones participan activamente en la fermentación, lo que se demuestra en este documento ya que las variables de PC o NT aparecen en 12 de las ecuaciones obtenidas y participan en todas las ecuaciones fermentativas.

Las variables de FDN y FDA muestran correlaciones positivas con el contenido de MS, sin embargo, esta variable sólo fue significativa ($p < 0.05$) en 2 ecuaciones para la predicción de FDN, estos datos son discrepantes a los obtenidos por Jayanegara *et al.* (2019) donde reportan una correlación significativa para estos datos. La variabilidad que existe en los contenidos de FDN y FDA durante la fermentación del ensilado se pueden atribuir al contenido de carbohidratos fermentables (Fernandez *et al.*, 2021), su

disminución es producto de la degradación de los microorganismos por la actividad proteolítica y fibrolítica (Saeedb *et al.*, 2017), por otro lado Lauer y Darby (2002) asocian a las concentraciones de FDN y FDA a procesos de lignificación ya que aumentan los contenidos de materia seca y disminuye las concentraciones de carbohidratos solubles, lo que explica su presencia en las ecuaciones predictoras para estas dos variables mostrando que es un factor importante al momento del ensilaje, a pesar de que su concentración es variable, está asociada a la edad, especie y condiciones de crecimiento de la planta y forma parte de la estructura de la pared celular de la planta (Alfarjani *et al.*, 2013), sin embargo, su presencia no se correlaciona positivamente con los procesos fermentativos datos que concuerdan con los reportados por Rath *et al.* (2013).

Los datos muestran un aumento en las concentraciones de extracto etéreo después del ensilaje de 3.43 a 4.55, esto puede ser resultado de la formación de ácidos grasos volátiles (AGV) durante el proceso de fermentación (Saeedb *et al.*, 2017), su contenido aumenta en forrajes maduros por lo que se relaciona con el tiempo de cosecha (Ertekin *et al.*, 2018). Se han reportado por Rath *et al.* (2013) correlaciones positivas con cantidades de extracto etéreo y carbohidratos solubles en agua, datos que difieren con los hallados en este documento, sin embargo, si mostró una correlación significativa con carbohidratos totales.

Variables Fermentativas

Los coeficientes de determinación de las variables fermentativas son aceptables para el caso de ácido láctico, el mayor coeficiente de determinación fue para la segunda ecuación de ácido propiónico (0.73) y pH (0.62), para las demás ecuaciones se considera que los coeficientes son bajos, Kasmei *et al.*, (2013), presenta índices de determinación similares, para la predicción de productos de la fermentación con discrepancias en este estudio en el cálculo de ácido acético donde presentan un coeficiente de determinación mayor en su predicción de 0.63 en comparación con el obtenido en este documento de 0.22.

Los niveles de pH presentan una correlación significativa ($p < 0.05$) con fracciones de carbohidratos (CT y CNE) y proteína, no obstante, no presentaron una correlación

positiva ni significativa con carbohidratos solubles y contenido de materia seca, es bien conocido que la tasa de incremento y disminución del pH depende de la concentración bacteriana del forraje, el contenido de materia seca como potencial osmótico y la capacidad amortiguadora Pitt *et al.* (1985), hechos que se confirman en la primera ecuación con la incidencia de las variables de materia seca, carbohidratos solubles y estructurales, estos dos últimos utilizados como sustratos para las bacterias epifitas ácido lácticas, la tasa de materia seca se ha asociado a la tasa de crecimiento bacteriano, a mayor cantidad de materia seca la tasa de crecimiento bacteriano disminuye y aumenta la tasa de mortalidad aumentando los niveles de pH (Pitt *et al.*, 1985), éstos también se pueden ver afectados por la cantidad de proteína presente en el forraje, en este estudio existe una correlación significativa y está presente en ambas ecuaciones, de acuerdo con Jayanegara *et al.* (2020) a mayor nivel de proteínas aumenta la proteólisis en proceso fermentativo aumentando los niveles de amoníaco y los niveles de pH que conduce a una fermentación heterofermentativa por parte de las bacterias ácido lácticas, disminuyendo la calidad del ensilado por lo que el nivel de pH es un indicador de calidad (Kim y Adesogan, 2006), el pH reportado en la literatura de este estudio se encuentran en promedio en niveles de 3.92 por lo que se consideran aceptables de acuerdo a los niveles reportados por Saeedb *et al.*, (2017) por debajo de 4.57.

La presencia de carbohidratos solubles y materia seca en las ecuaciones predictoras de ácido láctico concuerdan por las reportadas por Pitt *et al.* (1985), el contenido de ácido láctico se asocia con el aumento o disminución de bacterias epifitas en el forraje principalmente por *Lactobacillus* y *Pediococcus* (Lin *et al.*, 2022; Rooke y Hatfield, 2003), la acción de las bacterias ácido lácticas tienen un papel importante en la fermentación, disminuyen los niveles de pH, FDA, FDN y nitrógeno amoniacal, mientras que aumentan el contenido de materia seca y proteína cruda (Blajman *et al.*, 2020), de acuerdo con Sharif *et al.* (2023) el contenido de materia seca debe encontrarse en un rango del 30% al 35% para una mejor reproducción de las bacterias ácido lácticas, los datos en este estudio se encuentran dentro de ese rango pero el promedio se encuentra ligeramente reducido a 28% MS. La correlación positiva con el contenido de carbohidratos solubles puede ser producto de la hidrólisis ocurrida durante la fermentación (Pitt *et al.*, 1985) lo que conlleva a su disminución durante el proceso (Hisham *et al.*, 2022), se ha demostrado

que la baja disponibilidad de azúcares por un periodo prolongado puede cambiar el tipo de fermentación de homofermentativa a heterofermentativa aumentando las concentraciones de ácido acético (Li *et al.*, 2019). En condiciones normales existe una correlación positiva entre las bacterias homo y heterofermentativas que actúan sinérgicamente para la producción de ácidos y supresión de patógenos (Hisham *et al.*, 2022).

Los niveles de ácido acético se asocian principalmente al contenido de nitrógeno total de acuerdo con las ecuaciones obtenidas, las concentraciones de ácido acético reportadas en este documento se encuentran en promedio en 1.86, datos que coinciden con Kung *et al.* (2018) deben oscilar entre el 1 y 3% de MS siendo el segundo ácido con más concentración, la concentración moderada puede ser beneficiosa debido a la capacidad de inhibir el crecimiento y la actividad de levaduras (Muck *et al.*, 2018), el contenido de ácido acético se ve influenciado por el contenido de proteínas, como se demuestra en las ecuaciones, debido a un proceso de proteólisis y actividad de bacterias heterofermentativas que aumentan las concentraciones de acetato disminuyendo la calidad fermentativa al aumentar el pH (Jayanegara *et al.*, 2020), existe una degradación enzimática por parte de las proteasas y los iones de amonio que contrarrestan la caída del pH durante la fermentación (Jayanegara *et al.*, 2019), se ha documentado que el deterioro del ensilaje comienza por bacterias productoras de ácido acético o levaduras y/o ambos grupos, los factores que determinan su presencia son el contenido de humedad y la composición química (Courtin y Spoelstra, 1990), de acuerdo con, Kung *et al.* (2018) los contenidos altos de cenizas en el forraje aumentan la capacidad amortiguadora aumentando las concentraciones de ácido acético dando como resultado fermentaciones prolongadas, reduciendo la energía metabolizable. Una proteólisis extensiva reduce la eficiencia en la utilización de nitrógeno en la dieta de los rumiantes, de acuerdo a Owens *et al.* (1999) los niveles de carbohidratos pueden reducir la actividad proteolítica.

Los ensilados con una fermentación estable no presentarán cantidades detectables de ácido butírico ni propiónico (Hisham *et al.*, 2022), las concentraciones apropiadas para estos 2 ácidos son menores a 0.5% y 0.3-0.5% de MS respectivamente (Pahlow *et al.*, 2003), el promedio de los datos recabados en este estudio se encuentra en 0.16% para

ácido propiónico y 0.33% para ácido butírico, sin embargo, éstos oscilan muy por arriba de lo recomendado (1.6% y 7.4% MS respectivamente) representando altas pérdidas de materia seca y pobre recuperación de energía (Pahlow *et al.*, 2003), además de que la relación ácido láctico- ácido acético se encontrará disminuida.

La producción de ácido propiónico es el resultado de fermentaciones menores dada por las bacterias propiónicas, fermentadoras de glucosa, fructosa y glicerol (Pahlow *et al.*, 2003), pertenecientes a las concentraciones de carbohidratos solubles lo que explicaría su presencia en la ecuación 1, los niveles de ácido propiónico pueden mejorar la estabilidad aeróbica inhibiendo la presencia de levaduras pero este proceso sólo es eficiente en forrajes con una fermentación prolongada (Pahlow *et al.*, 2003), estas bacterias pueden utilizar como sustrato al ácido láctico, aumentando la pérdida de energía (McDonald *et al.*, 1991).

La presencia de materia seca en la ecuación predictora de ácido butírico se asocia con la presencia de microorganismos de descomposición en forrajes con alto contenido de humedad, Weinberg *et al.* (2008) reportó que en cultivos de maíz con bajo contenido de MS aumentaron las concentraciones de moho, que disminuye el valor nutricional reduciendo el contenido del almidón, aumentando la FDN y reduciendo la degradabilidad (Ferrero *et al.*, 2019). Como ya se mencionó el contenido alto de cenizas puede prolongar la fermentación promoviendo el crecimiento de levaduras y el consumo de ácido láctico (Fernandez *et al.*, 2021), se ha reportado por Pahlow *et al.* (2003) que 2 mol de ácido láctico se convierten en 1 mol de ácido butírico tras la contaminación de *Clostridium*.

Los coeficientes de determinación bajos pueden estar asociados a la falta de variables que intervienen en el proceso, se ha reportado por Fu *et al.* (2022) que la etapa de crecimiento afecta directamente la presencia de bacterias en cantidad y especie, por ende, a la ruta metabólica que se dará durante el proceso fermentativo, además de que, la estabilidad aeróbica del ensilado es el resultado de la interacción de factores ambientales, de cultivo, manejo en la cosecha, llenado del silo, manejo durante el almacenamiento y en la alimentación (Wilkinson and Davies, 2012), el control exitoso depende de minimizar las pérdidas en cada etapa del proceso de conservación y alimentación.

Sólo que se han reportado modelos matemáticos para la predicción de la calidad del ensilado para variables bromatológicas y fermentativas con equipos de refracción como el que se reporta por Ibáñez y Alomar, (2008) valores predictivos altos para fracciones complejas como lo son FDN y FDA ya que se tratan de estructuras de la pared celular, sin embargo, se han obtenido a través del NIRS.

CONCLUSIONES

Los coeficientes de determinación más altos fueron para las variables bromatológicas por lo que es factible su uso para la predicción nutricional del ensilado a partir de su composición química previa, un mayor número de datos para su modelación hace que estas ecuaciones sean más robustas y precisas.

En las variables fermentativas se obtuvieron coeficientes de determinación bajos, esto se puede explicar a la falta de datos de los artículos principalmente en los contenidos de ácido propiónico y butírico. Estas ecuaciones se pueden mejorar si se toman en cuenta otros factores como lo son la capacidad amortiguadora, el contenido y especie de microorganismos para determinar el tipo de fermentación que se llevará a cabo, así como el tiempo de cosecha.

La obtención de estas ecuaciones corrobora la información que existe sobre los procesos bioquímicos que ocurren en la fermentación anaeróbica del ensilado y sobre los parámetros que debemos tomar en cuenta al momento de ensilar cualquier sustrato, esta información ayudará a la toma de mejores decisiones en tipo de forraje y momento del corte, así como la necesidad de añadir algún tipo de aditivo que potencie la fermentación sin la necesidad de equipo especializado, haciendo más accesible en costos y tiempo al productor.

Los datos obtenidos nos brindan una idea de las variables a tomar en cuenta, para modelaciones futuras relacionadas con procesos fermentativos, especialmente la producción del ensilado.

LITERATURA CITADA

- Alfarjani, F., Aboderheeba, A. K., Benyounis, K., and Olabi, A. G. (2013). Modelling anaerobic digestion process for grass silage after beating treatment using design of experiment. *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*, 675-695.
- Amaral, R. C., Carvalho, B. F., Costa, D. M., Morenz, M. J. F., Schwan, R. F., and da Silva Ávila, C. L. (2020). Novel lactic acid bacteria strains enhance the conservation of elephant grass silage cv. BRS Capiaçú. *Animal Feed Science and Technology*, 264:114472.
- Araki, H. M. C., De Oliveira, E. R., Gandra, J. R., De Goes, R. H. T. B., Takiya, C. S., Jacaúna, A. G., ... and Duan Orbach, N. (2017). Association of biological and chemical additives on nutrient composition, total losses, microbiological and fermentative profile of sugarcane silage. *Iranian Journal of Applied Animal Science*, 7:577-584.
- Barghi, B., Rokouei, M., Maghsoudi, A., and Faraji-Arough, H. (2023). Comparison of different non-linear models for describing plasma lysozyme activity in quail. *Poultry Science Journal*, 11:39-46. doi:10.22069/psj.2022.20108.1803.
- Bernardes, T. F., De Oliveira, I. L., Lara, M. A. S., Casagrande, D. R., Ávila, C. L. S., and Pereira, O. G. (2015). Effects of potassium sorbate and sodium benzoate at two application rates on fermentation and aerobic stability of maize silage. *Grass and Forage Science*, 70:491-498.
- Blajman, J. E., Vinderola, G., Paez, R. B., and Signorini, M. L. (2020). The role of homofermentative and heterofermentative lactic acid bacteria for alfalfa silage: a meta-analysis. *The Journal of Agricultural Science*, 158:107-118.
- Bolsen, K. K., Ashbell, G., and Weinberg, Z. G. (1996). Silage fermentation and silage additives-Review. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 9:483-494.
- Bórquez, J. L., González-Muñoz, S. S., Pinos-Rodríguez, J. M., Domínguez, I., Bárcena, J.R., Mendoza, G.D., ... and Bueno, G. (2009). Feeding value of ensiling fresh cattle manure with molasses or bakery by-products in lambs. *Livestock Science*, 122: 76-280.
- Borreani, G., Tabacco, O., Schmidt, R. J., Holmes, B. J., and Muck, R. E. (2018). Silage review: Factors affecting dry matter and quality losses in silages. *Journal of Dairy Science*, 101:3952-3979.

- Bureenok, S., Langsoumechai, S., Pitiwittayakul, N., Yuangklang, C., Vasupen, K., Saenmahayak, B., and Schonewille, J. T. (2019). Effects of fibrolytic enzymes and lactic acid bacteria on fermentation quality and in vitro digestibility of Napier grass silage. *Italian Journal of Animal Science*, 18:1438-1444.
- Buxton, D. R., and O'Kiely, P. (2003). Preharvest factors affecting ensiling. In: Buxton D.R., Muck R.E. and Harrison J.H. (eds) *Silage science and technology*. Madison, WI, USA: Agronomy Publication No. 42:199-250.
- Campana, M., Carmo, B. S., Santos, R. M., Garcia, T. M., Capucho, E., de Azevedo, E. B., ... and Del Valle, T. A. (2021). Fermentative profile and nutritional value of sugarcane silages inoculated with a mixture of fibrolytic enzymes. *Crop and Pasture Science*, 72:467-473.
- Cardoso, L. L., Ribeiro, K. G., Marcondes, M. I., Pereira, O. G., and Weiß, K. (2018). Chemical composition and production of ethanol and other volatile organic compounds in sugarcane silage treated with chemical and microbial additives. *Animal Production Science*, 59:721-728.
- Carvalho, W. G., COSTA, K. A. D. P., Epifanio, P. S., Perim, R. C., Teixeira, D. A. A., and Medeiros, L. T. (2016). Silage quality of corn and sorghum added with forage peanuts. *Revista Caatinga*, 29:465-472.
- Chen, L., Li, J., Dong, Z., Yuan, X., and Shao, T. (2018). Effects of applying oil-extracted microalgae on the fermentation quality, feed-nutritive value and aerobic stability of ensiled sweet sorghum. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98:4462-4470.
- Cobos, P. M., González, S.M., Mendoza, G. D. M., García, C. B., and Bárcena, R. G. (1997). Nutritional evaluation of cattle manure, molasses and corn stover silage for lambs. *Small Ruminant Research*, 25: 33-38.
- Costa, L. A., de Araújo, M. J., Edvan, R. L., Bezerra, L. R., de Sousa, A. R., Viana, F. J. C., and Dias-Silva, T. P. (2020). Chemical composition, fermentative characteristics, and in situ ruminal degradability of elephant grass silage containing *Parkia platycephala* pod meal and urea. *Tropical Animal Health and Production*, 52:3481-3492.
- Costa, R. R. G. F., Costa, K. D. P., de Souza, W. F., Epifanio, P. S., Santos, C. B., da Silva, J. T., and Oliveira, S. S. (2018). Production and quality of silages pearl millet

- and Paiaguas palisadegrass in monocropping and intercropping in different forage systems. *Bioscience Journal*, 34:957-967.
- Courtin, M. G., and Spoelstra, S. F. (1990). A simulation model of the microbiological and chemical changes accompanying the initial stage of aerobic deterioration of silage. *Grass and Forage Science*, 45:153-165.
- Cui, Y., Liu, H., Gao, Z., Xu, J., Liu, B., Guo, M., ... and Shi, Y. (2022). Whole-plant corn silage improves rumen fermentation and growth performance of beef cattle by altering rumen microbiota. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106: 4187-4198
- da Silva, J. S., Ribeiro, K. G., Pereira, O. G., Mantovani, H. C., Cecon, P. R., Pereira, R. C., and Silva, J. D. L. (2018). Nutritive value and fermentation quality of palisadegrass and stylo mixed silages. *Animal Science Journal*, 89:72-78.
- da Silva, M. A. J., Neto, J. M. C., Alves, M. A. D. S. M., and Santos, E. M. (2021). Potencialidades e limitações de plantas forrageiras para ensilagem: Revisão de Literatura. *Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal*, 15:1-17.
- Da Silva, T. C., Da Silva, L. D., Santos, E. M., Oliveira, J. S., and Perazzo, A. F. (2017). Importance of the fermentation to produce high-quality silage. *Fermentation processes*, 1-20.
- Darby, H. M., and Lauer, J. G. (2002). Harvest date and hybrid influence on corn forage yield, quality, and preservation. *Agronomy Journal*, 94: 559-566.
- de Paula Freitas, A. W., Pereira, J. C., Rocha, F. C., Costa, M. G., de Paula Leonel, F., and Ribeiro, M. D. (2006). Avaliação da qualidade nutricional da silagem de cana-de-açúcar com aditivos microbianos e enriquecida com resíduo da colheita de soja1. *R. Bras. Zootec*, 35:38-47.
- Del Valle, T. A., do Nascimento, G., Fernandez, L. S., França, M. M., Osório, J. A., Gandra, J. R., ... and Morais, J. P. (2019). Whole corn grain addition in sugarcane silage avoids fermentative losses and improves in situ degradation of silage. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales*, 7:493-501.
- Del Valle, T. A., Zenatti, T. F., Antonio, G., Campana, M., Gandra, J. R., Zilio, E. M. C., ... and de Morais, J. G. P. (2018). Effect of chitosan on the preservation quality of sugarcane silage. *Grass and Forage Science*, 73:630-638.

- Ertekin, I., İbrahim, A. T. I. Ş., and Yilmaz, Ş. (2023). The Effect of Cultivar and Stage of Growth on the Fermentation, Aerobic Stability and Nutritive Value of Ensiled Quinoa. *Journal of Agricultural Sciences*, 29: 478-490.
- Feedipedia. (2012-2022). Animal Feed Resources Information System. INRAE CIRAD AFZ and FAO. Disponible en: <https://www.feedipedia.org/>
- Feng, L., Kristensen, E. F., Moset, V., Ward, A. J., and Møller, H. B. (2018). Ensiling of tall fescue for biogas production: Effect of storage time, additives and mechanical pretreatment. *Energy for Sustainable Development*, 47:143-148.
- Fernandez, Taype. R., Contreras, P. J. L., Curasma, C. J., Cordero, F. A., Rojas De La Cruz, Y. C., Ruiz, D., and Huaman, J. R. (2021). Efecto de *Saccharomyces cerevisiae* y tiempos de fermentación sobre la composición química del ensilado de avena y cebada. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32.
- Ferrero, F., Prencipe, S., Spadaro, D., Gullino, M. L., Cavallarin, L., Piano, S., ... and Borreani, G. (2019). Increase in aflatoxins due to *Aspergillus* section *Flavi* multiplication during the aerobic deterioration of corn silage treated with different bacteria inocula. *Journal of dairy science*, 102: 1176-1193.
- Ferrero, F., Tabacco, E., and Borreani, G. (2019). Effects of a mixture of monopropanone and monobutyryl on the fermentation quality and aerobic stability of whole crop maize silage. *Animal Feed Science and Technology*, 258:114319.
- Ferrero, F., Tabacco, E., and Borreani, G. (2021). *Lentilactobacillus hilgardii* inoculum, dry matter contents at harvest and length of conservation affect fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage. *Frontiers in Microbiology*, 12:675563.
- Flores, M., Sanchez, R., Luna, R., and Echavarria, F. (2014). Microsilos: una alternativa para pequeños productores. *Folleto para Productores*, 18.
- France, J., and Kebreab, E. (2008). Mathematical modelling in animal nutrition-introduction. In *Mathematical modelling in animal nutrition*. Wallingford UK: Cabi. 1-11.
- Fu, Z., Sun, L., Wang, Z., Liu, J., Hou, M., Lu, Q., ... and Ge, G. (2022). Effects of growth stage on the fermentation quality, microbial community, and metabolomic properties of Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silage. *Frontiers in Microbiology*, 13.

- Gandra, J. R., Oliveira, E. R., Takiya, C. S., Goes, R. H. T. B., Paiva, P. G., Oliveira, K. M. P., ... and Haraki, H. M. C. (2016). Chitosan improves the chemical composition, microbiological quality, and aerobic stability of sugarcane silage. *Animal Feed Science and Technology*, 214:44-52.
- Gomes, R. D. S., Almeida, J. D. C., Carneiro, J. D. C., Azevedo, F. H. V., Lista, F. N., Elyas, A. C. W., and de Oliveira, T. S. (2017). Impacts of citrus pulp addition and wilting on elephant grass silage quality.
- Gurgel, A. L. C., dos Santos Difante, G., Ítavo, L. C. V., Neto, J. V. E., Ítavo, C. C. B. F., Fernandes, P. B., ... and Chay-Canul, A. J. (2023). Aspects related to the importance of using predictive models in sheep production. Review. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, 14:204-227.
- Haddaway, N. R., Macura, B., Whaley, P., and Pullin, A. S. (2017). ROSES flow diagram for systematic maps. Version 1.0. DOI: 10.6084/m9.figshare.6085940
- Hamilton, M. A. (1991). *Model validation: an annotated bibliography. Communications in Statistics - Theory and Methods*, 20:2207–2266. doi:10.1080/03610929108830628
- Herrmann, C., Heiermann, M., and Idler, C. (2011). Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresource technology*, 102:5153-5161.
- Higgs, R. J., Chase, L. E., and Van Amburgh, M. E. (2012). Development and evaluation of equations in the cornell net carbohydrate and protein system to predict nitrogen excretion in lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 95: 2004-2014. doi:10.3168/jds.2011-4810
- Hisham, M. B., Hashim, A. M., Mohd Hanafi, N., Abdul Rahman, N., Abdul Mutalib, N. E., Tan, C. K., ... and Mohd Yusoff, N. F. (2022). Bacterial communities associated with silage of different forage crops in Malaysian climate analysed using 16S amplicon metagenomics. *Scientific Reports*, 12:7107.
- Hosoda, K., Eruden, B., Matsuyama, H., and Shioya, S. (2009). Silage fermentative quality and characteristics of anthocyanin stability in anthocyanin-rich corn (*Zea mays* L.). *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 22:528-533.
- Ibáñez, L., and Alomar, D. (2008). Prediction of the chemical composition and fermentation parameters of pasture silage by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS).

- INRA. (1989). Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. Institut National de la Recherche Agronomique, John Libbey Eurotext, Montrouge, France
- Jayanegara, A., Sujarnoko, T. U., Ridla, M., Kondo, M., and Kreuzer, M. (2019). Silage quality as influenced by concentration and type of tannins present in the material ensiled: A meta-analysis. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 103: 456-465.
- Jayanegara, A., Wardiman, B., Kondo, M., Ridla, M., and Laconi, E. B. (2020). Fermentative quality of silage as affected by protein level in the ensiled material: A meta-analysis. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 462:1.
- Junges, D., Schmidt, P., Novinski, C. O., and Daniel, J. L. P. (2013). Additive containing homo and heterolactic bacteria on the fermentation quality of maize silage. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 35:371-377.
- Júnior, R. C., Capucho, E., Garcia, T. M., Del Valle, T. A., Campana, M., Zilio, E. M., ... and Morais, J. P. (2020). Lemongrass essential oil in sugarcane silage: Fermentative profile, losses, chemical composition, and aerobic stability. *Animal Feed Science and Technology*, 260:114371.
- Kasmaei, K. M., Rustas, B. O., Spörndly, R., and Udén, P. (2013). Prediction models of silage fermentation products on crop composition under strict anaerobic conditions: A meta-analysis. *Journal of dairy science*. 96: 6644-6649.
- Keles, G., Kurtoglu, V., Demirci, U., Ates, S., Canatan, T., Kan, M., and Gunes, A. (2014). Conservation characteristics of triticale-Hungarian vetch silage ensiled with homo-fermentative or hetero-fermentative lactic acid bacteria in jars. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 14:69-79.
- Kim, S. C., and Adesogan, A. T. (2006). Influence of ensiling temperature, simulated rainfall, and delayed sealing on fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage. *Journal of Dairy Science*, 89: 3122-3132.
- Knudsen, K. E. B. (1997). Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Animal feed science and technology*, 67: 319-338.
- Kung, Jr., Shaver, R. D., Grant, R.J., and Schmidt, R. J. (2018). Silage review: Interpretation of chemical, microbial, and organoleptic components of silages. *Journal of dairy Science*, 101: 4020-4033.

- Lanuza, F., Klein, F., Dumont, J.C., and Saldana, R. (1995). Ensilaje mezcla de alfalfa-pradera gramíneas y suplementación de concentrado para reemplazos de lechería. *Boletín Técnico-Instituto de Investigaciones Agropecuarias*.
- Li, D., Ni, K., Zhang, Y., Lin, Y., and Yang, F. (2019). Fermentation characteristics, chemical composition and microbial community of tropical forage silage under different temperatures. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 32: 665.
- Lin, J., Li, G., Sun, L., Wang, S., Meng, X., Sun, L., ... and Xu, L. (2022). Varieties and ensiling: Impact on chemical composition, fermentation quality and bacterial community of alfalfa. *Frontiers in Microbiology*, 13.
- López-Garrido, S. J., Peralta, M. A. C., Martínez, G. D. M., and Camacho-Escobar, M. A. C. E. (2014). The effect of commercial additive (toxic-check) and propionic acid on the fermentation and aerobic stability of silage with pig excreta. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1820-1831.
- Martínez-Ávalos, A. M. M., Mendoza-Martínez, G.D., González-Muñoz, S., Gómez-Vázquez, A., Estrada-Botello, M., de la Cruz-Lázaro, E., ... and Pinos-Rodríguez, J. M. (2008). Evaluación in vitro de un ensilado de estiércol, rastrojo de maíz y melaza. *Universidad y ciencia*, 24: 247-250.
- McAllister, T. A., and Hristov, A. N. (2000). The fundamentals of making good quality silage. *Adv. Dairy Technol*, 12:381-399.
- McDonald, P., Henderson, A. R., and Heron, S. J. E. (1991) The biochemistry of silage, 2nd edn. Marlow, UK: Chalcombe Publications.
- Meenongyai, W., Pattarajinda, V., Stelzleni, A. M., Sethakul, J., and Duangjinda, M. (2017). Effects of forage ensiling and ration fermentation on total mixed ration pH, ruminal fermentation and performance of growing Holstein-Zebu cross steers. *Animal Science Journal*, 88: 1372-1379.
- Mendonça, R. D. C. A. D., Cardoso, M. V. S. B., Pantoja, S. O. S., Souza, M. S. D., Domingues, F. N., Faturi, C., ... and Rêgo, A. C. D. (2020). Effects of cutting height and bacterial inoculant on corn silage aerobic stability and nutrient digestibility by sheep. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 49.
- Mendoza, G. D., Pinos, J. M., Ricalde, R., Aranda, E. M., and Rojo, R. (2003). Modelo de simulación para estimar el balance calórico de bovinos en pastoreo. *Interciencia*, 28: 202-207.

- Merry, R. J., and Davies, D. R. (1999). Propionibacteria and their role in the biological control of aerobic spoilage in silage. *Le Lait*, 79:149-164.
- Miao Fang, Zhang Fanfan, Tang Kaiting, Jia Shuan, Wang Xuzhe, and Ma Chunhui. (2017). Effects of homo/heterogeneous lactic acid bacteria addition on the fermentation characteristics, nutritional quality and aerobic stability of whole corn silage. *Acta Caoye Sinica*, 26:167.
- Miranda-Romero, L. A., Vazquez-Mendoza, P., Burgueño-Ferreira, J. A., and Aranda-Osorio, G. (2018). Nutritive value of cactus pear silages for finishing lambs. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 20:189-215.
- Mordenti, A. L., Giaretta, E., Campidónico, L., Parazza, P., and Formigoni, A. (2021). A review regarding the use of molasses in animal nutrition. *Animals*, 11:1-17. doi:10.3390/ani11010115.
- Muck, R. E., Nadeau, E. M. G., McAllister, T. A., Contreras-Govea, F. E., Santos, M. C., and Kung Jr, L. (2018). Silage review: Recent advances and future uses of silage additives. *Journal of dairy science*, 101:3980-4000.
- National Research Council. (2000). Nutrient requirements of beef cattle (updated 7th Ed.). National Academy Press, Washington, D.C.
- National Research Council. (2001). Nutrient requirements of dairy cattle: 2001. (updated 7th Ed.). National Academies Press, Washington, D.C.
- National Research Council. (2016). Nutrient Requirements of beef cattle. (updated 8th Ed). National Academy Press, Washington, D.C.
- Ortega, G. C y Mendoza, M. (2016). Uso de modelos de simulación en corrales de engorda. *EN: Alimentación del Ganado bovino con dietas altas en grano*. Mendoza MGD y Ricalde VR. Universidad Autónoma Metropolitana. pp. 176.
- Osorio, A. I., Mendoza, G. D., Plata, F. X., Martínez, J. A., Vargas, L., and Ortega, G. C. (2015). A simulation model to predict body weight gain in lambs fed high-grain diets. *Small Ruminant Research*, 123:246-250. doi:10.1016/j.smallrumres.2014.12.004.
- Owens, V. N., Albrecht, K. A., Muck, R. E., and Duke, S. H. (1999). Protein degradation and fermentation characteristics of red clover and alfalfa silage harvested with varying levels of total nonstructural carbohydrates. *Crop Science*, 39:1873-1880.

- Pahlow, G., Muck, R. E., Driehuis, F., Elferink, S. J. O., and Spoelstra, S. F. (2003). Microbiology of ensiling. *Silage science and technology*, 42:31-93.
- Pettersson, K. L., and Lindgren, S. (1990). The influence of the carbohydrate fraction and additives on silage quality. *Grass and Forage Science*, 45:223-233.
- Pinto, S., Warth, J. F. G., Novinski, C. O., and Schmidt, P. (2020). Effects of natamycin and *Lactobacillus buchneri* on the fermentative process and aerobic stability of maize silage.
- Pires, A. J. V., Carvalho, G. G. P. D., Garcia, R., Carvalho Junior, J. N. D., Ribeiro, L. S. O., and Chagas, D. M. T. (2009). Capim-elefante ensilado com casca de café, farelo de cacau ou farelo de mandioca. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38:34-39.
- Pitt, R. E., Muck, R. E., and Leibensperger, R. Y. (1985). A quantitative model of the ensilage process in lactate silages. *Grass and Forage Science*, 40:279-303.
- Rath, J., Heuwinkel, H., and Herrmann, A. (2013). Specific biogas yield of maize can be predicted by the interaction of four biochemical constituents. *BioEnergy Research*, 6:939-952.
- Rodrigues, P. H. M., Lobo, J. R., Silva, E. J. A. D., Borges, L. F. O., Meyer, P. M., and Demarchi, J. J. A. D. A. (2007). Efeito da inclusão de polpa cítrica peletizada na confecção de silagem de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*, Schum.). *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36:1751-1760.
- Rodrigues, P. H. M., Pinedo, L. A., Meyer, P. M., da Silva, T. H, and Guimarães, I. C. D. S. B. (2020). Sorghum silage quality as determined by chemical–nutritional factors. *Grass and Forage Science*, 75: 462-473.
- Rodrigues, P. H. M., Ruzante, J. M., Senatore, A. L., Lima, F. R. D., Melotti, L., and Meyer, P. M. (2004). Avaliação do uso de inoculantes microbianos sobre a qualidade fermentativa e nutricional da silagem de milho. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 33:538-545.
- Rooke, J. A., and Hatfield, R. D. (2003). Biochemistry of ensiling. *Silage science and technology*, 42:95-139.
- Sabertanha, E., Rouzbehan, Y., Fazaeli, H., and Rezaei, J. (2021). Nutritive value of sorghum silage for sheep. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 105:1034-1045. doi:10.1111/jpn.13548.

- Saeedb, A. A., Al-Sultani, H. M., and Mottaleb, A. S. (2017). Effect of addition of different levels of baker's yeast *Saccharomyces cerevisiae* on fermentation quality and nutritive value of ensiled corn crop residuals. *Euphrates J. Agric. Sci*, 9:8-18.
- Sainz-Ramírez, A., Botana, A., Pereira-Crespo, S., González-González, L., Veiga, M., Resch, C., ... and Flores-Calvete, G. (2020). Effect of the cutting date and the use of additives on the chemical composition and fermentative quality of sunflower silage. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 11:620-637.
- Santos, C. B. D., Costa, K. A. D. P., Souza, W. F. D., Oliveira, I. P. D., Teixeira, D. A. A., and Costa, J. V. C. P. (2020). Production and quality of sunflower and Paiaguas palisadegrass silage in monocropped and intercropping in different forage systems. *Acta Scientiarum. Animal Sciences*, 42.
- Schmidt, P., Rossi Junior, P., Junges, D., Dias, L. T., Almeida, R. D., and Mari, L. J. (2011). Novos aditivos microbianos na ensilagem da cana-de-açúcar: composição bromatológica, perdas fermentativas, componentes voláteis e estabilidade aeróbia. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 40:543-549.
- Seglar, B. (2003). Fermentation analysis and silage quality testing. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <https://hdl.handle.net/11299/108997>.
- Sharif, S., Hanif, N. Q., Ghazanfar, S., Imran, M., Naiel, M. A., and Alagawany, M. (2023). Dominance of bacillus sp. alter microbiological and nutritional quality and improve aerobic stability of the corn silage. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 1-11.
- Sifeeldein, A., Wang, S., Li, J., Dong, Z., Chen, L., Kaka, N. A., and Shao, T. (2019). Phylogenetic identification of lactic acid bacteria isolates and their effects on the fermentation quality of sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) silage. *Journal of applied microbiology*, 126:718-729.
- Souza, A. M. D., Neumann, M., Rampim, L., Almeida, E. R. D., Matchula, A. F., Cristo, F. B., and Faria, M. V. (2022). Effect of storage time on the chemical composition of whole and grainless corn plant silage harvested at different maturity stages. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 51.
- Souza, W. F. D., Costa, K. A. D. P., Guarnieri, A., Severiano, E. D. C., Silva, J. T. D., Teixeira, D. A. A., ... and Dias, M. B. D. C. (2019). Production and quality of the

silage of corn intercropped with Paiaguas palisadegrass in different forage systems and maturity stages. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 48

- Stoškus, R., Jatkauskas, J., Vrotniakienė, V., and Juozaitienė, V. (2017). The Effect of homo-and hetero-fermentative lactic acid bacteria mix on the ensiled lucerne fermentation characteristics and aerobic stability in big bales. In *Rural development 2017: bioeconomy challenges: proceedings of the 8th international scientific conference, 23-24 November, 2017, Aleksandras Stulginskis University, 134-138*.
- Tabacco, E., Righi, F., Quarantelli, A., and Borreani, G. (2011). Dry matter and nutritional losses during aerobic deterioration of corn and sorghum silages as influenced by different lactic acid bacteria inocula. *Journal of Dairy Science*, 94:1409-1419.
- Tedeschi, L. O. (2005). *Models: MES*. Mathematical Nutrition Models. Disponible en: <https://www.nutritionmodels.com/mes.html#Download>
- Tedeschi, L. O. (2006). Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural systems*, 89:225-247.
- Tedeschi, L. O. (2019). ASN-ASAS symposium: future of data analytics in nutrition: Mathematical modeling in ruminant nutrition: approaches and paradigms, extant models, and thoughts for upcoming predictive analytics. *Journal of animal science*, 97:1921-1944.
- Tedeschi, L. O., and Menendez, H. M. (2020). Mathematical modeling in animal production. *Animal Agriculture*, 431–453. doi:10.1016/b978-0-12-817052-6.00025-2
- Tejeda-Arroyo, E., Cipriano-Salazar, M., Camacho-Díaz, L. M., Salem, A. Z. M., Kholif, A. E., Elghandour, M. M. M. Y., ... and Cruz-Lagunas, B. (2015). Diet inclusion of devil fish (*Plecostomus* spp.) silage and its impacts on ruminal fermentation and growth performance of growing lambs in hot regions of Mexico. *Tropical animal health and production*, 47:861-866.
- Tian, X. Z., Paengkoum, P., Paengkoum, S., Thongpea, S., and Chao, B. A. N. (2018). Comparison of forage yield, silage fermentative quality, anthocyanin stability, antioxidant activity, and in vitro rumen fermentation of anthocyanin-rich purple corn (*Zea mays* L.) stover and sticky corn stover. *Journal of Integrative Agriculture*, 17:2082-2095.

- Wan, J. C., Xie, K. Y., Wang, Y. X., Liu, L., Yu, Z., and Wang, B. (2021). Effects of wilting and additives on the ensiling quality and in vitro rumen fermentation characteristics of sudangrass silage. *Animal Bioscience*, 34:56.
- Wanapat, M., Phesatcha, K., Viennasay, B., Phesatcha, B., Ampapon, T., and Kang, S. (2018). Strategic supplementation of cassava top silage to enhance rumen fermentation and milk production in lactating dairy cows in the tropics. *Tropical Animal Health and Production*, 50:1539-1546. doi:10.1007/s11250-018-1593-8
- Wanapat, M., Totakul, P., Viennasay, B., and Matra, M. (2021). Sunnhemp (crotalaria juncea, L.) silage can enrich rumen fermentation process, microbial protein synthesis, and nitrogen utilization efficiency in beef cattle crossbreds. *Tropical Animal Health and Production*, 53. doi:10.1007/s11250-021-02628-z.
- Wang, S., Wang, Y., Zhao, J., Dong, Z., Li, J., Nazar, M., ... and Shao, T. (2023). Influences of growth stage and ensiling time on fermentation profile, bacterial community compositions and their predicted functionality during ensiling of Italian ryegrass. *Animal Feed Science and Technology*, 298, 115606.
- Weinberg, Z. G., Yan, Y., Chen, Y., Finkelman, S., Ashbell, G., and Navarro, S. (2008). The effect of moisture level on high-moisture maize (*Zea mays* L.) under hermetic storage conditions—in vitro studies. *Journal of Stored Products Research*, 44:136-144.
- Wilkinson, J. M., and Davies, D. R. (2013). The aerobic stability of silage: key findings and recent developments. *Grass and forage Science*, 68:1-19.
- Yin, X., Long, J., Zhao, J., Wang, S., Dong, Z., Li, J., and Shao, T. (2023). Effect of growth stage on Italian ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) silage fermentation from microbiological perspective. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10:1-14.
- Zhang, F., Miao, F., Wang, X., Lu, W., and Ma, C. (2021). Effects of homo- and heterofermentative lactic acid bacteria on the quality and aerobic stability of corn silage. *Canadian Journal of Animal Science*, 101:761-770.
- Zhang, Q., Zhao, M., Wang, X., Yu, Z., and Na, R. (2017). Ensiling alfalfa with whole crop corn improves the silage quality and in vitro digestibility of the silage mixtures. *Grassland science*, 63:211-217.

Zieliński, M., Rusanowska, P., Zielińska, M., Dudek, M., Nowicka, A., Purwin, C., ... and Dębowski, M. (2021). Influence of preparation of *Sida hermaphrodita* silages on its conversion to methane. *Renewable Energy*, 163, 437-44.