

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL MAR
ESCUELA DE CIENCIAS AGRARIAS

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENSILABILIDAD Y VALOR
NUTRICIONAL DEL ENSILADO DE CUATRO VARIEDADES
COSTARRICENSES DE MAÍZ EN SANTA LUCÍA DE BARVA,
HEREDIA**

Trabajo de grado para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis
en agricultura sostenible

Estudiante:

Mauricio Gurdíán Guardia

Tutor:

Ph.D. William Sánchez Ledezma

Asesores:

Lic. José Pablo Jiménez Castro

M.Sc. Andrés Alpízar Naranjo

Campus Omar Dengo
Heredia, Costa Rica, 2018

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE ENSILABILIDAD Y VALOR
NUTRICIONAL DEL ENSILADO DE CUATRO VARIEDADES
COSTARRICENSES DE MAÍZ EN SANTA LUCÍA DE BARVA,
HEREDIA**

Estudiante

Mauricio Gurdián Guardia

**Trabajo final de graduación de tesis sometida a consideración del
tribunal examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias para optar por el
grado de Licenciatura en Ingeniería Agronómica**

Trabajo final de Graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de
Licenciado en Ingeniería Agronómica

Tribunal Examinador

Dr. Alejandro Zamora Meléndez
Representante Decano FCTM

Dr. Rafael Evelio Granados Carvajal
Director Escuela Ciencias Agrarias

Ph.D. William Sánchez Ledezma
Tutor de Tesis

Lic. José Pablo Jiménez Castro
Lector

M. Sc. Andrés Alpizar Naranjo
Lector

Mauricio Gurdián Guardia

INDICE GENERAL

INDICE GENERAL	2
INDICE DE TABLAS	5
ABREVIATURAS	7
1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN.....	5
4. OBJETIVOS	7
4.1. Objetivo general	7
4.2. Objetivos específicos	7
5. REVISIÓN DE LITERATURA	8
5.1. Concepto de ensilaje	8
5.2. Potencial de ensilabilidad	8
5.3. Importancia de la ensilabilidad	9
5.3.1. Contenido en materia seca	10
5.3.2. Azúcares solubles	11
5.3.3. Capacidad buffer	13
5.3.4. Nitratos	14
5.4. Proceso químico-biológico del ensilaje	15
5.4.1. Fase aeróbica	15
5.4.2. Fase de fermentación.....	16
5.4.3. Fase estable	19
5.4.4. Fase de deterioro aeróbico	19
5.5. Aditivos para ensilar	19
5.5.1. Conservantes	20
5.5.2. Inoculantes	20
5.5.3. Enzimas	20
5.5.4. Sustratos	21
5.5.5. Nutrientes	21
5.6. Parámetros de fermentación	22
5.6.1. Metabolitos de fermentación.....	22
5.6.2. Indicadores organolépticos.....	25
5.7. Variedades costarricenses de maíz.....	26

5.7.1.	EJN2.....	27
5.7.2.	J-Sáenz.....	27
5.7.3.	Los Diamantes 8843.....	27
5.7.4.	UPIAV-G6.....	28
5.7.5.	Proteinta.....	28
5.7.6.	Nutrigrano.....	28
6.1.	Ubicación.....	29
6.2.	Variedades de maíz evaluadas.....	30
6.3.	Diseño y desarrollo experimental.....	30
6.4.	Metodología de evaluación utilizada.....	31
6.4.1.	Potencial de ensilabilidad de los forrajes.....	31
6.4.2.	Efecto del proceso de ensilaje.....	32
6.4.3.	Calidad organoléptica de los ensilados.....	32
6.5.	Análisis de laboratorio.....	34
6.5.1.	En los forrajes verdes.....	34
6.5.2.	En los ensilados.....	36
6.6.	Análisis estadístico.....	36
6.7.	Estimación de los costos de producción.....	37
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
7.1.	Potencial de ensilabilidad.....	39
7.1.1.	Materia Seca.....	39
7.1.2.	Azúcares solubles.....	40
7.1.3.	Capacidad buffer.....	41
7.1.4.	Coefficiente de fermentación.....	43
7.2.	Efecto del proceso del ensilaje sobre la calidad nutricional de los forrajes.....	43
7.2.1.	Materia Seca.....	44
7.2.2.	Cenizas.....	46
7.2.3.	Proteína cruda.....	47
7.2.4.	Pared Celular.....	49
7.2.5.	Extracto Etéreo.....	53
7.2.6.	Digestibilidad in vitro de la materia seca.....	55
7.2.7.	pH.....	56
7.3.	Calidad organoléptica de los ensilados.....	58
7.4.	Costos de producción.....	59
8.	CONCLUSIONES.....	66

9. RECOMENDACIONES	68
10. LITERATURA CITADA.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros que condicionan el potencial de ensilabilidad de un forraje antes de ensilar (valores referidos en base seca).	10
Tabla 2. Tipos de aditivos utilizados en el proceso del ensilaje.	20
Tabla 3. Calidad de los ensilados de forrajes en función a los parámetros de fermentación	23
Tabla 4. Clasificación de ensilados en función a los parámetros organolépticos.	26
Tabla 5. Composición química del suelo donde se realizó el estudio. Finca Experimental Santa Lucia de Heredia.	29
Tabla 6. Descripción de los análisis bromatológicos y químicos realizados a los forrajes verdes antes de ensilar.	34
Tabla 7. Parámetros de ensilabilidad de cuatro variedades costarricenses de maíz evaluadas en Santa Lucía, Heredia.	39
Tabla 8. Calidad nutricional, digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca y pH de variedades de maíz costarricense antes y después de ensilar en Santa Lucía de Heredia.	44
Tabla 9. Costo de establecimiento, manejo y elaboración de ensilaje de una hectárea de maíz con fines forrajeros, en Santa Lucía de Heredia, 2016.	60
Tabla 10. Promedio de producción de forraje verde (FV) y costo por kilogramo de ensilado fresco (EF), materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD) en Santa Lucía de Heredia 2016.	62

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Contenido en materia seca (MS) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.	45
Figura 2. Contenido de cenizas (Ce) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.	46
Figura 3. Contenido en proteína cruda (PC) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.	48
Figura 4. Contenido en fibra detergente neutro, fibra ácido detergente y lignina detergente de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y sus respectivas variaciones. ...	50
Figura 5. Contenido de extracto etéreo (EE) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectivas variaciones.....	54
Figura 6. Contenido de digestibilidad in vitro de la materia seca de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.	55
Figura 7. Contenido de pH de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.	57
Figura 8. Distribución de las opiniones de los expertos sobre sobre las características organolépticas de los ensilados de cada tratamiento.	59
Figura 9. Contribución al costo de insumo y mano de obra requerida por hectárea de maíz forrajero, en Santa Lucía de Heredia, 2016.	61
Figura 10. Relación entre la producción de forraje verde por hectárea y el costo por kilogramo de materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD) de ensilado elaborado en la finca experimental de Santa Lucia de Heredia, 2016.	63

ABREVIATURAS

Abreviatura	Detalle	INTA	Instituto Nacional de
°C	Grados Celsius		Innovación y
AGV	Ácidos grasos volátiles		Transferencia
Ca	Calcio		Tecnológica
CB	Capacidad buffer		Agropecuaria
Ce	Cenizas	K	Potasio
CF	Coefficiente de fermentación	Kg	Kilogramos
AS	Azúcares solubles	Lig	Lignina
CIMMYT	Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo	m	Metros
CINA	Centro de Investigaciones en Nutrición Animal	MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
cm	Centímetros	meq	Mili equivalente
CO₂	Dióxido de carbono	Mg	Magnesio
Cu	Cobre	MJ/m²	Mega Julios por metro cuadrado
DE	Desviación estándar	mm	Milímetros
DIA	Dirección de Investigaciones Agropecuarias	mmol	Milimol
DIVMS	Digestibilidad <i>in vitro</i> de la materia seca	Mn	Manganeso
EE	Extracto etéreo	MS	Materia seca
EELD	Estación Experimental Los Diamantes	MSD	Materia seca digestible
FAD	Fibra ácido detergente	msnm	Metros sobre el nivel del mar
FCTM	Facultad de las ciencias de la Tierra y el Mar	N	Nitrógeno
Fe	Hierro	NaOH	Hidróxido de sodio
FND	Fibra neutro detergente	N-NH₃	Nitrógeno amoniacal
g	Gramos	NO³⁻	Nitratos
Ha	Hectárea	P	Significancia estadística
HCl	Ácido clorhídrico	P	Fósforo
hh	Horas hombre	PC	Proteína buta
hm	Horas maquinaria	pH	Índice de acidez
		r	Correlación estadística
		t	Toneladas
		UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
		Up	Unidades porcentuales
		Zn	Zinc

1. RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo determinar el potencial de ensilabilidad, la composición química y el costo de producción y conservación mediante la técnica del ensilaje de cuatro variedades costarricenses de maíz (*Zea mays L.*) en Santa Lucía de Barva de Heredia, durante agosto de 2015 y enero de 2016. Se establecieron parcelas experimentales de las variedades EJN2, Los Diamantes 8843, Proteinta y Nutrigrano, las cuales se cosecharon 90 días después, en estado fenológico de grano lechoso. Se analizó el coeficiente fermentación (CF) de los forrajes antes de ensilar, el efecto del ensilaje sobre la calidad nutricional de los mismos y el costo por kilogramo de materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD) de forraje conservado. Los datos correspondientes al potencial de ensilabilidad se analizaron mediante regresión univariante, mientras que los del efecto del ensilaje mediante comparación de medias. El CF no mostró diferencias significativas ($P > 0.05$) entre variedades, presentando todos los materiales valores intermedios (21.63 a 22.82), debido al alto contenido de humedad al momento de la cosecha, aunque la capacidad buffer (CB) de todas las variedades fue excelente ($CB < 38 \text{ meq NaOH}/100\text{gMS}$). El contenido de MS no fue afectado significativamente ($P = 0.669$) por el proceso del ensilaje, mientras que la proteína cruda (PC) se redujo ($P = 0.055$) levemente en 0.3 unidades porcentuales, sin diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los ensilados de las variedades. También, el contenido de fibra neutro detergente (FND) y extracto etéreo (EE) disminuyeron ($P = 0.001$) en 3.8 y 0.6 unidades porcentuales, respectivamente, durante el proceso de conservación. Además, los contenidos de cenizas (Ce), fibra ácido detergente (FAD), lignina (Lig) y la digestibilidad *in vitro* de la MS (DIVMS) incrementaron ($P = 0.001$) al ser ensilados, aumentando la DIVMS cuatro unidades porcentuales. Todos los ensilados

presentaron excelentes pH al final del proceso, con valores que oscilaron entre 3.85 y 4.0, sin diferencias significativas entre las variedades. El costo por kilogramo de ensilado fresco vario poco (¢22.0 y ¢27.1) entre variedades, pero el de MS (¢101.5 y ¢125.3) y MSD (¢153.4 y ¢183.3) fueron más fluctuantes, aportando la variedad EJN2 los menores costos y la Proteinta los valores más altos, debido principalmente a las diferencias en producción de biomasa. Todas las variedades de maíz evaluadas tienen potencial para ser conservadas mediante ensilaje, proceso que afectó positivamente la calidad nutritiva de los forrajes.

2. ABSTRACT

This study has as an objective to determine the ensilability potential, nutritive quality, and silage elaboration costs of four Costa Rican corn varieties in Santa Lucía, Heredia, during August 2015 and January 2016. Experimental plots were made with the following corn varieties: EJN2, Los Diamantes 8843, Proteinta, and Nutrigrano, which were harvested 105 days later when the grain was in milky phenological state. The fermentation coefficient (FC) before silage process, silage effect over the nutritive quality of the forages, and costs of dry matter per kilogram (DM) and digestible dry matter per kilogram (DDM) were analyzed. The data corresponding to ensilability potential was statistically analyzed by a univariate regression analysis; meanwhile the silage effect over the nutritive quality was analyzed by statistic averages comparison. The FC did not demonstrate significant statistical differences ($P > 0.05$) between varieties, showing intermediate FC values due to the high humidity at the harvest time. The values obtained were unrelated to the buffer capacity (BC), which was excellent. The dry matter (DM) content did not have a statistically significant effect ($P=0.669$) by the silage process. Meanwhile the crude protein (CP) reduced slightly ($P=0.055$) in 0.3 percentage units, with no statistically significant variation ($P>0.05$) between silage corn varieties. Also, the neutral detergent fiber (NDF) and ethereal extract (EE) reduced ($P=0.001$) in 3.8 and 0.6 percentage units during the silage process. In addition, all the silages studied showed excellent pH at the end of the process, with values that ranged between 3.85 and 4, with no statistically significant differences between varieties. The silage cost per kilogram varied slightly (¢22.0 and ¢27.1) between varieties, but the DM (¢101.5 and ¢125.3) and DDM (¢153.4 and ¢186.3) showed more differences between varieties, where EJN2 gave the lowest costs, and Proteinta the highest, due to the differences in the

biomass produced. All of the corn varieties evaluated have the potential to be conserved by the silage technique, which positively affected the nutrition quality of the forages used.

3. INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina es una de las actividades agropecuarias de mayor importancia socioeconómica de Costa Rica, debido a que, además de satisfacer la demanda interna del país, como es el caso de la leche, genera empleo y es fuente de divisas mediante las exportaciones de carne, leche y sus derivados (CNPL 2015; SEPSA 2015). Además, es la fuente de ingresos de muchas familias, representadas por 37 171 fincas dedicadas a la ganadería bovina mediante sistemas de lechería especializados (25.6%), carne y cría (42.1%) y doble propósito (32%) (INEC 2014).

En Costa Rica, la alimentación de los bovinos se basa principalmente en el pastoreo. Sin embargo, las especies tropicales utilizadas no logran suplir las necesidades nutricionales de los animales, situación que se ha agravado con los efectos del cambio climático, ya que en los últimos años se han registrados periodos adversos consecutivos de sequías y excesos de lluvias. En la época seca, el rendimiento y calidad nutritiva de las pasturas se reducen considerablemente, y en el periodo con exceso lluvia, el elevado contenido de agua en algunos pastos afecta negativamente el consumo voluntario de materia seca (Marais 2001; Miles *et al.* 2004). Además, durante la época lluviosa el pisoteo de los animales afecta negativamente el consumo de la pastura ofrecida.

Aunado a lo anterior, el potencial genético de la ganadería bovina en Costa Rica, principalmente del sector lechero, ha mejorado en las últimas décadas, y con ello los requerimientos nutritivos. Obligando a los ganaderos a utilizar alimentos balanceados a base de granos importados, lo que aumenta significativamente los costos de producción y disminuye la rentabilidad de la ganadería (MAG, 2010).

En un sistema de lechería especializado, el 41% de los costos totales corresponden al uso de alimentos balanceados, mientras que los pastos y forrajes producidos en la misma finca reflejan solamente un 3.5% de los costos de alimentación de los animales (Villalobos 2010).

Por lo anterior, los sistemas de producción bovina se encuentran en constante mejora, por medio de la implementación de alternativas nutricionales con tendencia hacia la autoproducción de las fuentes requeridas por los animales, mediante la suplementación con forrajes frescos o conservados (CNPL 2015).

Entre los forrajes utilizados en la suplementación de bovinos, el maíz (*Zea mays L*) es uno de los más usados. Su alto rendimiento y adecuado contenido de materia seca, carbohidratos solubles, almidón y capacidad buffer, lo convierte en el forraje ideal para elaborar ensilaje de excelente calidad (Martínez 2003; Cañete y Sancha 1998). Su uso como recurso forrajero ensilado, es una práctica común en los países de vocación ganadera, ya que contribuye a resolver el problema de la estacionalidad productiva que presentan las pasturas (Paliwal 2001). El maíz es una interesante mezcla de grano y fibra digestible, que constituye una de las principales fuentes energéticas para la alimentación de rumiantes (Ruiz *et al.* 2009).

En Costa Rica, a pesar de la amplia adaptación del cultivo de maíz (MAG 2010), su uso como recurso forrajero es escaso, con cierto aumento en las lecherías especializadas de la zona alta y norte del cantón de San Carlos. Otro aspecto importante de mencionar, es que en el país no hay oferta de variedades o híbridos con aptitud forrajera, por lo que los ganaderos utilizan variedades criollas de porte alto, las cuales tienen problemas de acame y bajos contenidos de materia seca. También utilizan híbridos importados, con el

inconveniente que no se conoce su adaptación en nuestro país y que en la mayoría de los casos, la semilla tiene un alto costo económico.

Existe la alternativa de utilizar las variedades costarricenses liberadas por el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) para la producción de grano, sin embargo, se desconoce la aptitud de las mismas para ser conservadas mediante la técnica del ensilaje.

Considerando lo anterior, se realizó la presente investigación, bajo el patrocinio del INTA de Costa Rica.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Determinar el potencial de ensilabilidad, la composición química y el costo de producción y conservación mediante la técnica del ensilaje de cuatro variedades costarricenses de maíz (*Zea mays L.*) en la Finca Experimental Santa Lucía, Heredia, Costa Rica.

4.2. Objetivos específicos

4.2.1. Determinar el potencial de ensilabilidad de las variedades de maíz Los Diamantes, EJN2, Nutrigrano y Proteinta.

4.2.2. Evaluar el efecto del ensilaje sobre la composición química y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca de las variedades de maíz Los Diamantes, EJN2, Nutrigrano y Proteinta.

4.2.3. Determinar el pH y características organolépticos de las variedades de maíz Los Diamantes, EJN2, Nutrigrano y Proteinta.

4.2.4. Determinar el costo por kilogramo de ensilado fresco, de materia seca y materia seca digestible de cada variedad de maíz.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. Concepto de ensilaje

En el proceso de ensilaje de los forrajes se pueden diferenciar tres términos: ensilaje, silo y ensilado. El ensilaje es la técnica de conservación mediante la cual, se inhibe el crecimiento de microorganismos degradadores de la materia orgánica. El proceso permite contrarrestar el desarrollo de organismos descomponedores por la presencia de ácidos, sean estos agregados o producidos por la fermentación natural.

El silo es un depósito de dimensión y forma variable, en donde se almacena el forraje en capas uniformes, eliminando el aire mediante compactación y cubriéndolo, para que finalmente se lleve a cabo el proceso de fermentación. El ensilado es el forraje conservado, obtenido después de estabilizada la fermentación (Mannetje 2001).

De acuerdo con Jiménez (2002), el proceso de ensilaje es una técnica que permite conservar forraje en un estado físico similar al que poseía al momento de la cosecha, modificando su composición química por las fermentaciones que sufre. La finalidad del proceso consiste en desencadenar en la biomasa almacenada fermentaciones lácticas que reduzcan el pH y estabilicen el forraje. Sin embargo, durante el proceso se pueden dar fermentaciones acéticas y butíricas que degradan la proteína y generan amoníaco y otros derivados que deterioran la calidad del forraje ensilado.

5.2. Potencial de ensilabilidad

La ensilabilidad se define como la aptitud que tiene un forraje para ser ensilado, lo cual, depende del valor de materia seca (MS), azúcares solubles (AS), capacidad buffer (CB) y de nitratos al momento de la cosecha. Es importante que el contenido de los dos primeros

indicadores sean altos, pero la CB y los nitratos bajos (Argamentoría *et al.* 1997; O'kkiely *et al.* 1989; McDonald *et al.* 1991). Más adelante se presentan los aspectos más relevantes que se deben conocer de un forraje antes de ensilar.

5.3. Importancia de la ensilabilidad

En términos generales, la calidad final de un ensilado depende de dos factores: de la eficiencia con que se realizan las labores mecánicas requeridas en el proceso de ensilaje (cosecha, picado, compactación, sellado del silo, etc) y de las características del forraje a ensilar (Martínez 2003). Con respecto a las labores del proceso, es indispensable realizarlas correctamente para evitar pérdidas ocasionadas por: respiración celular del forraje después cosechado, actividad proteolítica que algunas enzimas ejercen sobre el forraje durante el periodo de conservación, actividad de gérmenes del género *Clostridium*, y por el desarrollo de microorganismos aerobios (Muck 1988). En ésta fase del proceso es posible incluir los aditivos químicos y biológicos, los cuales se detallaran más adelante.

En cuanto a las características del forraje a ensilar, el coeficiente de fermentación (CF) es un indicador que se utiliza para determinar el potencial de fermentación de un forraje antes de ser ensilado, el cual, depende del contenido de MS, AS, CB y de los nitratos que tiene el forraje al momento de la cosecha (Weissbach y Honig 1996). En función a estos, el potencial de ensilabilidad de un forraje antes de ensilar se puede clasificar en tres rangos: alto, medio o bajo (Tabla 1). Aunque según Martínez (2003), se pueden definir rangos medios. Por ejemplo, en el caso de un forraje que contenga entre 8 y 15% AS y 20% de MS, la ensilabilidad sería media-baja. En caso de superar los 350 meq/kg MS de CB, sería baja-media.

Tabla 1. Parámetros que condicionan el potencial de ensilabilidad de un forraje antes de ensilar (valores referidos en base seca).

Parámetro	Potencial de ensilabilidad		
	Alto	Medio	Bajo
Materia seca (%)	> 25	20-25	< 20
Azúcares solubles (%)	> 25	8-15	< 8
Capacidad buffer (mq/kg MS)	< 250	250-350	> 350
Nitratos (%)	< 10	10	> 10

Fuente: Martínez (2003).

5.3.1. Contenido en materia seca

La fracción de la MS resulta de gran importancia para el proceso de ensilabilidad. Actúa como controladora del proceso de fermentación. Chaverra y Bernal (2001), indican que cuando el valor de dicha fracción es superior al 25%, los efluentes se reducen significativamente, lo que disminuye las pérdidas de carbohidratos por la misma vía. Pero cuando es superior al 30 %, las pérdidas por respiración se disminuyen. Además, se reduce el pH, permitiendo el dominio de las bacterias ácido-lácticas (Sandoval 2004; Mangado 2006).

Las bacterias del género *Clostridium* son perjudiciales para la calidad del ensilado. Requieren de condiciones húmedas para su desarrollo, pero su acción se puede reducir cuando el pH de la fermentación es bajo (Smetham 1990). Cuando se ensila un forraje con 30% de MS, se logra restringir la actividad clostridial. Por el contrario, cuando la MS es igual o inferior al 20%, existe crecimiento de clostridios incluso a pH= 4 (Mannetje 2001; Smetham 1990).

Para alcanzar los valores deseados de MS algunas veces es necesario la implementación de técnicas de pre henificado (oreado, pre secado) del forraje previo a ensilar, que deberá ser lo más rápido posible y no exceder las 36 horas. Las pérdidas de MS y de nutrientes, pueden

reducirse a la mitad al comparar un ensilado pre henificado con uno que no se haya sometido al proceso (De la Roza *et al.* 1996).

El contenido óptimo de MS para la conservación de los forrajes se sitúa entre el 30 y 35%, rango con el cual, es posible minimizar las pérdidas de la calidad del forraje (Alltech 2003). Sin embargo, otros autores (Argamentarúa *et al.* 1997; Martínez 2003), consideran que el valor mínimo debe ser del 20%, y que la situación se agrava cuando el porcentaje de MS es igual o inferior al 15%.

En condiciones normales, durante el proceso de conservación, las pérdidas de MS deben oscilar entre el 6 y 8%, las cuales ocurren principalmente por la respiración del forraje, los microorganismos aeróbicos y clostridios (Alaniz 2008).

5.3.2. Azúcares solubles

Los carbohidratos están presentes en todos los vegetales y en la mayoría de las semillas. Se clasifican en tres grupos: los simples o solubles como la glucosa, sacarosa y fructosa, los de reserva como el almidón, y los estructurales como la celulosa y la hemicelulosa, los cuales forman parte de la pared celular (Sandoval 2004; Maiztegui 2000).

A los carbohidratos simples también se les denomina solubles, porque son sustancias que se disuelven fácilmente en agua, entre los que se incluyen los monosacáridos, disacáridos y oligosacáridos. Estos carbohidratos hidrosolubles o azúcares solubles, son indispensables en el proceso de ensilaje, ya que son la principal fuente de energía para el crecimiento microbiano. El bajo contenido de AS en el forraje a ensilar, pueden limitar las condiciones de la fermentación, debido a que no se logra disminuir el pH a las condiciones óptimas.

El contenido de AS en un forraje, depende principalmente del tipo de cultivo, del manejo y de las condiciones meteorológicas (Alaniz 2008; Woolford 1984). Estos autores indican que las gramíneas contienen más AS que las leguminosas. En cuanto al manejo, McGrath (1992) considera que si la fertilización nitrogenada de un forraje a ensilar es alta (>200 kg/ha/año), se reduce la concentración de azúcares. Además, se incrementa las concentraciones de nitratos, lo que reduce la producción de ácido láctico (Martínez 2003).

Con respecto a las condiciones meteorológicas, varios autores (McDonald *et al.* 1991; Cajarville *et al.* 2007) consideran que la excesiva precipitación y la alta temperatura (calor), reducen el contenido de azúcares en los forrajes, mientras que la radiación solar favorece la fotosíntesis de las plantas y por tanto, la producción de azúcares. Además, se considera que en un día gris y nublado la concentración de azúcar en un forraje es menor que en un día claro y soleado, y más si la noche anterior fue fría (Guillet 1984; Cajarville 2007). Estos autores consideran que la temperatura, intensidad de la luz, la precipitación del día anterior y la hora de la cosecha, tienen mayor relevancia en la concentración de azúcares que la madurez de la planta.

La concentración de AS en el forraje a ensilar, es indispensable para lograr una buena fermentación. Los azúcares solubles presentes en un forraje, son un buen indicador para predecir la aptitud que tiene para ser ensilado, ya que son sustratos que permitirán producir suficiente ácido láctico para reducir el pH, que evita la actividad de bacterias *Clostridium* y fermentaciones secundarias no deseadas (Martínez 2003).

En cuanto al requerimiento de azúcares solubles para lograr una buena fermentación, existen diferencias entre las investigaciones. Sandoval (2004) considera que se requiere entre 6 a

12% de AS en base seca, aunque otros autores (Haigh 1990; Wilkinson 1981; Parker y Crawshaw 1982; McDonald *et al.* 1991) indican que las concentraciones deben ser entre el 25 y 35% en base seca.

5.3.3. Capacidad buffer

La CB o capacidad tampón, se define como la resistencia que presenta la planta a los cambios de pH. Es un indicador importante en el proceso del ensilaje, el cual se expresa en miliequivalentes de álcali por kilogramo de materia seca (meq NaOH/kg MS) necesarios para reducir el pH de 6 a 4 (Martínez 2003). La capacidad de permitir reducciones de pH de un forraje después de cortado, depende de la composición de la planta en cuanto a proteína cruda, iones inorgánicos (Ca, K, Na) y la combinación de ácidos orgánicos (Jobim *et al.* 2007).

La edad de la planta tiene relevancia en el proceso de ensilaje, debido a que al aumentar, se disminuye la relación hoja/tallo del forraje, reduciendo con ello los procesos metabólicos. Como consecuencia, se reduce el contenido de ácidos orgánicos, lo que conlleva a un descenso de la CB del forraje conforme la planta madura (De La Roza 2005). Entre mayor sea la CB, más ácido láctico será necesario producir durante el proceso del ensilaje para alcanzar el pH óptimo (4), y por lo tanto, se necesita mayor cantidad de azúcares fermentables (Bertoia 2004).

Fundamentalmente, la CB de un forraje varía de acuerdo con la especie. Las gramíneas presentan menores valores que las leguminosas. El pasto ryegrass presenta valores que oscilan entre 250 a 400 meq NaOH/kg MS, mientras que se observan valores entre 500 y 600

meq NaOH/kg MS para el trébol y la alfalfa, por lo que las leguminosas resultan más difíciles de ensilar (McDonald *et al.* 1991; Muck *et al.* 1991; Martínez 1994).

En el caso del maíz, varios autores presentan valores que oscilan entre 200 y 600 meq de NaOH/kg MS (McDonald *et al.* 1991; Martínez *et al.* 2000). En un estudio realizado en Costa Rica con maíz en asociación con vigna (*Vigna radiata*), se encontraron valores que oscilaron entre 52.4 y 90.0 meq de NaOH/100g MS (Castillo *et al.* 2009). En general, con valores de CB inferiores a 350 meq NaOH/kg MS es posible lograr la correcta acidificación de la masa forrajera (Martínez 2003).

5.3.4. Nitratos

La fertilización nitrogenada es una labor fundamental para obtener un buen rendimiento en el cultivo forrajero. No obstante, su aplicación en determinadas cantidades puede alterar negativamente el contenido en azúcares de los forrajes (Reid 1982; McGrath 1992) e incrementar la capacidad buffer. Según Martínez (2003), con dosis moderadas de fertilización nitrogenada (170 kg N/ha/año), se acumulan entre 5 a 10 g de nitrato (NO_3^-)/kg MS de forraje, concentraciones que no afectan negativamente la fermentación, puesto que mejoran la eficiencia de la utilización de los azúcares por las bacterias lácticas. Por el contrario, con aplicaciones elevadas (>300 kg N/ha/año) se elevan las concentraciones de nitratos en el forraje (>10 g NO_3^- /kg MS), lo cual es perjudicial, ya que se restringe la fermentación láctica (Martínez 2003). Resumiendo, es posible afirmar que los nitratos ejercen su influencia en el ensilado de tres formas:

- Los contenidos de azúcar y nitratos se correlacionan negativamente (McGrath 1992).
- Durante el proceso de ensilaje, los nitratos se reducen a nitritos y éstos inhiben la formación de ácido láctico y activan la aparición de ácido butírico (Martínez 2003).

- La reducción de nitratos incrementa la acidez en la masa forrajera (Martínez 2003).

Cuando el forraje tiene un contenido bajo en nitratos (<5 g/kg MS) el proceso del ensilaje dependerá exclusivamente de los factores anteriormente mencionados: materia seca, azúcares solubles y capacidad buffer del forraje, así como de las labores del proceso y de los microorganismos presentes en el forraje (Woolford 1984).

5.4. Proceso químico-biológico del ensilaje

Cuando un forraje se ensila, experimenta un conjunto de transformaciones por el efecto de las enzimas y microorganismos presentes en el forraje, o bien, por la incorporación voluntaria (aditivos) o involuntaria (contaminación) durante el proceso (Cañete y Sancha 1998).

De acuerdo con Stefanie *et al.* (2001), el proceso del ensilaje se puede dividir en cuatro fases:

5.4.1. Fase aeróbica

Esta fase dura unas pocas horas y es el periodo durante el cual el oxígeno atmosférico que se encuentra presente en la masa vegetal disminuye rápidamente.

Después de cosechado el forraje, siempre y cuando haya presencia de oxígeno, las células continúan respirando, produciendo anhídrido carbónico y agua, a expensas de los carbohidrato del forraje (Mier, 2008). Por otro lado, la respiración también ocasiona descomposición de las proteínas del forraje, lo cual, es un proceso indeseable, ya que genera pérdidas de nitrógeno al ser liberado como amonio. Además, éste inhibe la producción de ácido láctico, el cual, es necesario para conservar el material ensilado (Stefanie *et al.* 2001),

En ésta etapa la respiración presente se debe al material vegetal en mayor proporción y también a los microorganismos aeróbicos facultativos como las levaduras y las enterobacterias. Además, hay una actividad importante de varias enzimas vegetales, como

las proteasas y las carbohidrasas, siempre que el pH se mantenga en el rango normal (6.5-6.0) en el jugo del forraje fresco (Stefanie *et al.* 2001).

Se debe entender que mientras haya presencia de oxígeno en el silo, la respiración no se va a detener. Por lo tanto, es necesario que esta etapa sea lo más corta posible, para suprimir la actividad de las bacterias aeróbicas e iniciar la fermentación (Filippi 2011).

5.4.2. Fase de fermentación

Inicia al agotarse el oxígeno dentro del silo, razón por la cual empieza a dominar la microflora anaeróbica: bacterias, levaduras y mohos que se desarrollan en ambiente anaeróbico.

En esta fase, las bacterias producen ácidos orgánicos, en especial el ácido láctico, a partir de los azúcares solubles o carbohidratos. Esta fase dura de 10 a 21 días, dependiendo de las características del material y de las condiciones del forraje al momento del ensilaje. Si la fermentación se desarrolla con éxito, la actividad de bacterias del ácido láctico va a proliferar y se convertirá en la población predominante.

En esta fase se producen los ácidos orgánicos, fundamentales para la conservación del forraje ensilado, pues estos llevan a la acidificación (reducción del pH) del material ensilado, lo que permite el dominio de las bacterias deseables sobre los microorganismos anaerobios indeseables, como son las enterobacterias, levaduras, bacilos y clostridios que compiten por los carbohidratos solubles disponibles en el material ensilado, y que pueden llevar a formar fermentaciones inadecuadas, incluyendo la pudrición del forraje (Filippi 2011).

En general, las bacterias productoras de ácido láctico son más tolerantes a la acidez y por consiguiente, pueden resistir un pH más bajo que los microorganismos anaerobios indeseables. Sin embargo, llega un momento en que la acidez es tal, que ya no permite el

crecimiento de las bacterias lácticas y se da paso a la fase siguiente que es la estabilización del forraje ensilado (Stefanie *et al.* 2001).

A causa de la producción de ácido láctico y otros ácidos, el pH disminuye. Se considera que cuando un ensilaje alcanza valores de pH inferiores a 4.2, ha logrado su estabilidad fermentativa óptima (Stefanie *et al.* 2001).

5.4.2.1. Fermentación láctica

Es la fermentación más importante en el proceso del ensilaje, donde se busca disminuir el valor del pH por medio de microorganismos productores de ácido láctico. La población microbiana productora de ácido láctico son los *Lactobacillus*, los cuales, se encuentran presentes en el forraje al momento de la cosecha, y se reproducen rápidamente en el proceso de fermentación (Stefanie *et al.* 2001).

Las bacterias *Lactobacillus* consumen los carbohidratos de la masa forrajera como fuente energética, y excretan ácido láctico. Los *Lactobacillus* producen ácido láctico, disminuyendo el valor de pH del forraje hasta que la acidez del medio les impide su desarrollo. Al momento en que el pH se encuentra en dicho punto y los *Lactobacillus* detienen su desarrollo, por escasez de azúcares solubles y acumulación de ácido láctico, se considera que el forraje se encuentra conservado (Stefanie *et al.* 2001).

5.4.2.2. Fermentación acética

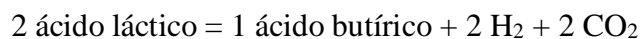
Se genera con el desarrollo de bacterias ácido tolerantes y aeróbicas obligatorias, las cuales en su mayoría pertenecen al género *Acetobacter* (Spoelstra *et al.* 1988). La actividad de *Acetobacter* spp. en el ensilaje es dañina porque puede iniciar una deterioración aeróbica, oxidando el lactato y el acetato produciendo CO₂ y agua. Generalmente, las responsables

principales del inicio del deterioro aeróbico son levaduras, ya que las bacterias acéticas se encuentran ausentes o no participan en el deterioro aeróbico del forraje. No obstante, existe evidencia que estas bacterias pueden iniciar un deterioro aeróbico en el ensilaje de maíz cuando se incluye toda la planta entera, conformada por el grano y forraje (Filippi 2011). Por otro lado, la inhibición selectiva de las levaduras también puede aumentar la proliferación de bacterias que producen ácido acético en el ensilaje (Stephanie *et al.* 2001).

5.4.2.3. Fermentaciones secundarias

Son el conjunto de fermentaciones no deseables y resulta primordial minimizarlas para el éxito del ensilado. La fermentación butírica es considerada la más perjudicial, la cual está a cargo de las bacterias del género *Clostridium*. También se pueden desarrollar las fermentaciones alcohólicas, causadas por las levaduras, con producción de etanol y otros alcoholes (Aguilera *et al.* 2008).

Las fermentaciones secundarias se dan en mayor proporción por las bacterias clostridiales, las cuales son aeróbicas, que pueden fermentar tanto los carbohidratos como las proteínas, por lo que disminuyen el valor nutritivo del ensilado. La especie de mayor importancia en las lecherías es *Clostridium tyrobutyricum*, un organismo ácido tolerante. Además de poder fermentar carbohidratos, *C. tyrobutyricum* también puede degradar el ácido láctico en ácido butírico, por la reacción descrita a continuación:



Un ensilado típico con fermentaciones clostridiales, presenta valores altos de ácido butírico (> 5g/kg de MS), pH alto (> 5), bajo contenido de MS y alta concentración de amoníaco (Stephanie *et al.* 2001).

5.4.3. Fase estable

Se presenta cuando termina el proceso de fermentación y los microorganismos reducen lentamente su presencia. Sin embargo, algunos microorganismos acidófilos sobreviven este período en estado inactivo, como los clostridios y bacilos, que persisten como esporas. Sólo algunas proteasas, carbohidrasas, y microorganismos especializados que toleran ambientes ácidos, continúan activos pero a menor ritmo (Stefanie *et al.* 2001).

5.4.4. Fase de deterioro aeróbico

Esta fase comienza con la apertura del silo y la exposición del ensilado al aire, lo cual es inevitable cuando se requiere extraer el ensilado a la hora de suministrar a los animales. El período de deterioro puede dividirse en dos etapas. La primera inicia con la degradación de los ácidos orgánicos del ensilado, por acción de levaduras y ocasionalmente por bacterias que producen ácido acético, lo que aumenta el pH. La segunda comienza con aumento de la temperatura y la actividad de microorganismos que deterioran el ensilado, como algunos bacilos, mohos y enterobacterias (Stefanie *et al.* 2001; Roa *et al.* 2010).

5.5. Aditivos para ensilar

Los aditivos son sustancias químicas o biológicas que se agregan a la masa forrajera a ensilar con el fin de mejorar la conservación y el valor nutritivo del producto final (ensilado). Según su acción, se pueden clasificar en cinco grupos: conservantes, inoculantes, enzimas, sustratos y nutrientes (Argamentería *et al.* 1997). En la Tabla 2 presentan los tipos de aditivos más utilizados en la elaboración de ensilajes.

Tabla 2. Tipos de aditivos utilizados en el proceso del ensilaje.

Conservantes	Inoculantes	Enzimas	Sustratos	Nutrientes
Ácido fórmico	Bacterias del	Amilasas	Melaza	Urea
Ácido Acético	ácido láctico:	Celulasas	Glucosa	Carbonato
Ácido Láctico	<i>Lactobacillus</i>	Hemicelulasas	Sacarosa	de calcio
Ácido propiónico	<i>Pediococcus</i>	Pectinasas	Granos de cereales	Otros
Ácido benzoico	<i>Streptococcus</i>		Pulpa de cítricos	minerales
Ácido Caproico				

Fuente: Argamentería *et al.* 1997.

5.5.1. Conservantes

Los conservantes inhiben las fermentaciones indeseables. Brindan a la masa de forraje una acidez inicial que favorece la actividad de las bacterias lácticas. Otros tienen acción bacteriostática, limitando la multiplicación de bacterias no deseables. También tienen efecto sobre la flora láctica, el forraje se acidifica muy poco y conserva casi todos sus azúcares, pero se estabiliza precisamente gracias a esa mínima vida bacteriana. También hay conservantes con efecto bacteriostático y acidificante a la vez (Argamentería *et al.* 1997).

5.5.2. Inoculantes

Los inoculantes poseen el papel primordial de elevar rápidamente el nivel de acidez del forraje a ensilar para prevenir la ruptura de la proteína, aportando microflora láctica que puede no estar presente en cantidad suficiente, lo que dejaría campo libre a otros microorganismos cuya acción puede no ser deseable (De la Roza 2005).

5.5.3. Enzimas

Las enzimas más comunes son aquellas que degradan las paredes celulares de las plantas como celulasas, pectinasas y hemicelulasas o mezclas de los anteriores. Con la ruptura de

dichas partes de la planta, aumenta el contenido de azúcares solubles, los cuales son fermentados por bacterias lácticas, favoreciendo así la acidificación (Argamentería *et al.* 1997).

5.5.4. Sustratos

Los sustratos como las materias azucaradas, son rápidamente utilizados por las bacterias lácticas que los hidrolizan y transforma en ácido láctico. Generalmente se utiliza la melaza, residuo de azucarería con un 50% de sacarosa, lactosuero en polvo, subproducto de la fabricación de quesos que contiene entre un 50-75% de azúcares (De la Roza 2005).

5.5.5. Nutrientes

Es probable que la urea sea el producto más viejo usado para mejorar los niveles proteicos en el ensilaje, en especial, cuando son de gramíneas como el maíz o el sorgo, los cuales se caracterizan por los bajos contenidos de proteína. La urea se descompone en amoníaco (NH_3) y CO_2 en el silo. Posiblemente el NH_3 , se combina con el ácido láctico y el acético formando sales. Cuando un rumiante ingiere ensilado con estas sales, éstas aportan NH_3 , muy demandado por los microorganismos del rumen (Garriz y Lopez 2002). Resulta importante destacar que en el caso concreto del maíz forrajero, el cual habitualmente no presenta problemas de fermentación, cabe agregar urea y productos amoniacales para incrementar el contenido de proteína del ensilado. Pero es necesario ajustar muy bien la dosis y distribuirla homogéneamente. Además, de compactar bien la biomasa por capas y asegurar el sellado y cierre hermético del silo. La adición de inoculantes no es contraproducente, pero el maíz forrajero fermenta muy bien sin la ayuda de los mismos, dejando en duda su posible mejoría y compensación económica (De la Roza *et al.* 2005; Martínez *et al.* 2003).

5.6. Parámetros de fermentación

Finalizado el proceso del ensilaje, la calidad del producto final (ensilado) se puede determinar mediante los metabolitos de fermentación y los indicadores organolépticos. Los principales metabolitos fermentativos utilizados para valorar la calidad del ensilado son: pH, N-soluble y N-amoniacal, ácido láctico, ácidos grasos volátiles (Jobim *et al.* 2007), mientras que entre los indicadores organolépticos más relevantes se encuentran: el color, el olor, la textura y la humedad del ensilado (Chaverra y Bernal 2001).

5.6.1. Metabolitos de fermentación

Como producto de la fermentación, el pH del forraje cambia, lo que produce una serie de metabolitos, siendo el N-soluble, N-amoniacal, los azúcares residuales, el ácido láctico y los ácidos grasos volátiles (AGV's) los más relevantes (McDonald *et al.* 1991; Martínez *et al.* 1999; De la Roza *et al.* 2005; Martínez 2003). De acuerdo con dichos metabolitos, la calidad de los ensilados se puede clasificar en: excelente, buena, regular, mala y muy mala (Martínez *et al.* 1999). En la Tabla 3, se presentan la concentración de los metabolitos más importantes para determinar la calidad de un ensilado.

Tabla 3. Calidad de los ensilados de forrajes en función de los parámetros de fermentación

Calidad	N-soluble (% N total)	N-amoniacal (% N total)	Ácido láctico (% MS)	Ácidos grasos volátiles (% MS)		
				Total	Acético	Butírico
Excelente	< 50	< 7	> 3	< 4	< 2	Ausencia
Buena	50-60	7-10	1.5-3	4-7	2-4	Trazas
Regular	60-65	10-15	1.5-0.5	7-10	4-5.5	< 0.5
Mala	> 65	15-20	< 0.5	10-13	5.5-7.5	> 0.5
Muy mala	> 75	> 20	Ausencia	> 13	> 7.5	> 0.5

Fuente: Martínez *et al.* (1999).

5.6.1.1. pH

El pH es un indicador de vital importancia en el proceso de ensilaje. Sirve como referencia o indicador de la calidad fermentativa que alcanzó el forraje, debido a que refleja las transformaciones más radicales que ocurren en el forraje y porque mantiene estrecha relación con los procesos degradativos que se dan durante la conservación (Jiménez y Moreno 2002). Después de cosechar el forraje, es necesario que el descenso del pH ocurra lo más pronto posible para garantizar un hábitat desfavorable para las bacterias *Clostridium* y reducir la respiración. De forma que se inhibe la proteólisis y la proliferación de los microorganismos indeseables en el proceso. Se considera que cuando un ensilaje alcanza valores de pH= 4.2 ha logrado su estabilidad fermentativa (Cevallos 2005; Muck 1988). Cuando esto ocurre, se inhiben las bacterias indeseables y son remplazadas por las lácticas. Estos microorganismos comienzan a crecer en el tiempo, siempre y cuando existen carbohidratos disponibles. Cuando esto sucede, se acumula ácido láctico, el cual es responsable de la adecuada fermentación del forraje (Pezo 1981; Fernández 1999). Caso contrario se da cuando el pH es

mayor a 5, ya que en este caso predomina las fermentaciones secundarias (ácido butírico), deteriorando el material forrajero (Sandoval 2004).

5.6.1.2. N-Soluble y N-Amoniacal

El nitrógeno soluble y amoniacal (N-NH₃), son variables utilizadas como medida de la degradación de la proteína que tuvo lugar durante el proceso de ensilaje.

El contenido de N-NH₃ en el ensilado, es utilizado como indicador de mala preservación del material. El nivel de N-NH₃ se relaciona inversamente con la concentración de carbohidratos solubles de la planta original.

Las leguminosas y gramíneas forrajeras en estados tempranos de desarrollo, tienen bajas concentraciones de azúcares y altos contenido de proteína. Si los forrajes se ensilan en dichas condiciones, la producción de ácido láctico es pobre, permitiendo el desarrollo de las bacterias clostridiales, las cuales son responsables de fermentaciones secundarias que transforman el ácido láctico en butírico y degradan proteínas y aminoácidos aumentando el nivel de N-NH₃ (Fernández 1999). La escasez de esta fracción en el jugo del ensilado, indica que tuvo lugar una correcta fermentación láctica, con transformación de los azúcares presentes en el forraje, en este ácido lo que contribuirá de manera fundamental a la reducción de pH y a la estabilidad del ensilado (De la Roza 2005).

5.6.1.3. Ácido láctico

El ácido láctico es el responsable de impedir el desarrollo de microorganismos indeseables en el ensilado, y de esta forma se logra una correcta conservación de los nutrientes contenidos en las plantas. Se utiliza como medida de la transformación de los azúcares presentes en el

forraje en éste importante ácido, el cual contribuirá de manera fundamental a la reducción del pH y estabilidad del ensilado (De la Roza 2005).

5.6.1.4. Ácidos grasos volátiles

Los ácidos grasos volátiles (AGV) son generados en las distintas fermentaciones que se llevan a cabo durante el proceso del ensilaje, la presencia o ausencia de algunos pueden determinar la calidad del material ensilado.

La actividad metabólica fermentativa sobre los hidratos de carbono conducen a la formación de ácidos orgánicos como son el láctico, acético, butírico y propiónico. Un ensilado bien hecho posee la mayor proporción de ácido láctico, poco de propiónico y nada o trazas de ácido acético y butírico (Martínez *et al.* 1999).

Con la excepción al ácido láctico, los productos volátiles procedentes de otras fermentaciones distintas de la fermentación láctica, contribuyen a la inestabilidad y deterioro del ensilado. El ácido acético y butírico deben estar ausentes o en cantidades despreciables, ya que son el resultado de fermentaciones no deseables inducidas por la presencia de bacterias coliformes que transforman el ácido láctico en ácido acético y de gérmenes butíricos (De la Roza 2005).

5.6.2. Indicadores organolépticos

Además de los metabolitos de fermentación, la calidad de los ensilados también se puede valorar en función de los parámetros organolépticos como el olor, el color, la textura y la humedad (Chaverra y Bernal 2001). En la Tabla 4 se presenta la clasificación de los ensilados según los parámetros organolépticos anteriormente indicados.

Tabla 4. Clasificación de ensilados en función a los parámetros organolépticos.

Calidad	Parámetro organolépticos			
	Olor	Color	Textura	Humedad
Excelente	Verde aceituna	Agradable, a fruta madura	Conserva los contornos definidos	No humedece al comprimir
Buena	Verde amarillo	Agradable, ligero a vinagre	Conserva los contornos definidos	No humedece al comprimir
Regular	Verde oscuro	fuerte a vinagre	Bordes del ensilado mal definido	Al comprimir gotea efluentes
Mala	Oscuro, casi negro	Desagradable, a putrefacción	Masa amorfa y jabonosa al tacto	Al comprimir destila efluentes

Fuente: Chavaría y Bernal (2001)

Cuando el pH de un ensilado es igual o superior a 5, las bacterias indeseables, principalmente *Costridium*, fermentan los azúcares solubles y los ácidos orgánicos produciendo ácido butírico, CO₂ e hidrógeno, resultando un ensilado de color negro y olor a rancio. En ocasiones otros microorganismos fermentan los aminoácidos produciendo amoniaco con olor a orina, o aminas con olor a pútrido, lo que puede ocasionar reducción en el consumo voluntario de los animales (Pezo 1981; Fernández 1999).

5.7. Variedades costarricenses de maíz

En las últimas dos décadas, la Dirección de Investigaciones Agropecuaria (DIA) del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), y más recientemente el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA) han liberado seis variedades de maíz para la producción de grano, cuatro de grano blanco (J-Sáen, UPIA-G6, Los Diamantes 8843 y Proteinta) y dos de grano amarillo (EJN2 y Nutrigrano). A pesar de que

muchos ganaderos las utilizan como recurso forrajero para alimentar los animales, su potencial forrajero y de ensilabilidad aún no han sido evaluados.

5.7.1. EJN2

Variedad del INTA de grano amarillo, de mazorca y planta mediana, otorgada por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Fue seleccionada en Costa Rica para la producción de grano por su adaptabilidad a diversos ambientes, liberada en 1986. El grano se utiliza en la industria y el forraje en la alimentación animal. Su rendimiento de grano oscila entre 3 y 4 t/ha. Sin embargo, en el Pacífico Central y Norte de Costa Rica, específicamente en el cantón de Cañas, puede alcanzar mayores rendimientos (Bonilla 2009b).

5.7.2. J-Sáenz

Variedad del INTA seleccionada de material criollo, de grano blanco, mazorca grande y planta de porte alto, liberada en Costa Rica en 1998 para la producción de grano. Es una variedad criolla mejorada, que también se usa en la elaboración de ensilaje y producción de elote. Su rendimiento de grano varía entre 2 y 3 t/ha (Sánchez *et al.* 2017).

5.7.3. Los Diamantes 8843

Variedad del INTA de grano blanco y mazorca grande, obtenida de la población 43 del CIMMYT. Fue seleccionada en la Estación Experimental Los Diamantes (EELD) del INTA de Costa Rica para la producción de grano y liberada en 1998. Tolerante a gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) y al hongo tizón o quema (*Helminthosporium turcicum*), con amplio rango de adaptación. Se recomienda utilizar en la producción de grano para la industria de harinas y derivados. Su rendimiento de grano oscila entre 3 y 4 t/ha (Bonilla 2009b).

5.7.4. UPIAV-G6

Variedad del INTA de grano blanco, liberada en nuestro país en el 2006 para la producción de grano. Tolerante a gusano cogollero y a tizón o quema, con buena capacidad de adaptación. Se recomienda usar como grano para la industria de harinas y derivados. Su rendimiento de grano oscila entre 3 y 4 t/ha (Sánchez *et al.* 2017).

5.7.5. Proteinta

Es una variedad del INTA de grano blanco, proveniente de CIMMYT y liberada en el 2009 en Costa Rica para la producción de grano. Fue seleccionada por sus características de rendimiento, calidad de grano, adaptación y tolerancia a los principales problemas bióticos del cultivo. La textura del grano es semidentado, con buena adaptación a diferentes ambientes. Responde bien bajo condiciones de alta pluviosidad y alta temperatura, donde se desarrolla problemas de pudrición de mazorca. Se recomienda utilizar en la producción de grano para la industria y la alimentación animal. Su rendimiento de grano oscila entre 5 y 7 t/ha (Bonilla 2009b).

5.7.6. Nutrigrano

Variedad del INTA de grano amarillo, biofortificada con alta calidad de proteína en el grano. Proviene del CIMMYT y seleccionada en Costa Rica para la producción de grano por su amplio rango de adaptación a diferentes ambientes, liberado en el 2007. Responde bien bajo condiciones alta pluviosidad y alta temperatura, donde se presentan problemas de pudrición de la mazorca. Su rendimiento de grano varía entre 5 y 7 t/ha (Bonilla 2009b).

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación

La investigación se realizó en la Finca Experimental Santa Lucía de la Universidad Nacional de Costa Rica, ubicada en Santa Lucía del cantón de Barva, provincia Heredia, durante el período comprendido entre agosto de 2015 y enero de 2016.

La finca se localiza en la zona de vida bosque húmedo tropical (bh-T) (Holdridge 1979) a 1 220 msnm en las coordenadas 10°1'20'' latitud norte y 84°06'45'' longitud oeste, donde el promedio anual de precipitación, humedad relativa y temperatura es 2 182 mm, 78% y 21.5°C, respectivamente (IMN 2013). Durante el ciclo del cultivo (agosto a diciembre 2015) la precipitación fue de 1 443.3 mm y el promedio mensual de brillo solar fue de 5.18 MJ/m², mientras que la temperatura osciló entre 16.3 y 26.7°C (IMN 2015).

El suelo es de origen volcánico del orden de los Andisoles. De fertilidad moderada, definida por las características de las cenizas que los forman (Bertsch 1993).

En la Tabla 5, se presenta la composición química del suelo donde se realizó el estudio, así como los valores obtenidos para cada nutriente analizado.

Tabla 5. Composición química del suelo donde se realizó el estudio. Finca Experimental Santa Lucía de Heredia.

Muestra y rango óptimo	pH	Cmol (+)/l				mg/l				
		Al	Ca	Mg	K	P	Zn	Mn	Cu	Fe
Muestra	5,6	0,16	10,23	0,9	0,58	6,3	0,9	2	2,7	148
Rango óptimo	5,6-6,5	0,5-1,5	4-20	1-5	0,2-0,6	1-20	2-10	6-50	3-20	11-100

El porcentaje de saturación de Al⁺³ del suelo es de 1,35 %, lo que no afectó el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que el cultivo de maíz tolera hasta 10 % de saturación (Molina

y Meléndez 2002; Trapsoil 1991). Los contenidos de Ca y K se encuentran dentro del rango óptimo, mientras el Mg es bajo, lo que provoca un desequilibrio en las relaciones catiónicas Ca/Mg y Mg/K principalmente (Berscht 1995). Según Molina y Meléndez (2002), un suelo óptimo tiene una relación Ca/Mg entre 2-5. En el caso del terreno de la finca, la relación es 11,3, lo que evidencia deficiencia de Mg, lo que fue corregido con la fertilización realizada. También el análisis del suelo evidencia contenidos de P adecuados, lo cual es normal en suelos de origen volcánico del orden de los Andisoles (Berscht 1995).

6.2. Variedades de maíz evaluadas

Se evaluaron cuatro variedades costarricenses de maíz, descritas en la sección 5.7. del presente documento.

- EYN2
- Los Diamantes 8843
- Proteinta
- Nutrigrano

6.3. Diseño y desarrollo experimental

Para realizar el estudio se establecieron parcelas experimentales de 5 x 10 m de ancho y largo, respectivamente, de cada variedad en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por tratamiento.

Previo al establecimiento, el terreno se preparó pasando una vez el arado de discos y la rastra, con el fin de que la estructura del suelo fuera la óptima. Después de tratar la semilla con fungicida a base de Carboxin + Thiram para prevenir patologías con hongos, se realizó la siembra manualmente y a “espeque”, en surcos distanciados a 0,75 m entre sí, y 20 cm entre plantas, a razón de 30 kg/ha de semilla, la cual fue cubierta con una delgada capa de tierra de

aproximadamente 1 cm de espesor. Posteriormente, se aplicó Atrazina como control pre-emergente de malezas.

Las parcelas fueron fertilizadas a razón 150, 60, 40, 12 y 15 kg/ha de nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio y azufre, respectivamente; para lo cual fue necesario aplicar 460, 67 y 296 kg/ha de las fórmulas químicas 10-30-10, K-MAG y Urea, respectivamente. Las dosis P, K, Mg y S se aplicaron al momento de la siembra, mientras que la dosis de N se fraccionó en cuatro aplicaciones, cada 15 días posterior al establecimiento.

La cosecha se realizó cuando el grano se encontraba en estado lechoso, antes de que alcanzara la “línea de leche” (grano pastoso), con el fin de evitar el hurto de mazorcas que es común en la localidad.

El forraje cosechado en cada parcela se cortó en trozos de 2 cm de longitud utilizando una picadora mecánica acoplada a un tractor. Posteriormente, se tomó una muestra aleatoria de 1 kg de cada tratamiento y repetición, la cual se envió al laboratorio (CINA) para determinar la composición química (MS, PC, FND, FAD, Lig, EE y Ce), los azúcares solubles, capacidad buffer, el pH y la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (DIVMS).

6.4. Metodología de evaluación utilizada

6.4.1. Potencial de ensilabilidad de los forrajes

Para estudiar el potencial de ensilabilidad de los forrajes, se utilizó la metodología propuesta por Weissbach and Honig (1996), la cual consiste en determinar el coeficiente de fermentación (CF) de cada forraje antes de ensilar mediante la siguiente fórmula:

$$CF = \frac{MS + 8 * AS}{CB}$$

Donde;

CF= Coeficiente de fermentación

MS= Materia seca (%)

AS= Azúcares solubles (%)

CB= Capacidad buffer (meq NaOH/ kg MS)

6.4.2. Efecto del proceso de ensilaje

Para analizar el efecto del proceso del ensilaje sobre la composición química, la DIVMS y el pH de los forrajes, se elaboraron silos con el material cosechado en cada parcela experimental, utilizando bolsas de polietileno de 7 micras con capacidad para 80 kg. El llenado de las bolsas o silos se realizó agregando el forraje en capas de 20 cm, compactándolo por pisoteo entre capas con el fin de expulsar el oxígeno del silo. El proceso de agregación y compactación del forraje continuó hasta llenar la bolsa, la cual finalmente se cerró herméticamente utilizando una cuerda.

Se elaboró un total de 12 silos, tres repeticiones por cada variedad de maíz. Cada silo se pesó individualmente y se almacenó en un lugar seguro, protegido del sol, la lluvia y roedores.

Después de 60 días, se pesaron y abrieron los silos. Al momento de la apertura se tomó una muestra representativa, en el centro de cada silo, para determinar el pH, la composición química (MS, PC, FND, FAD, Lig, EE y Ce) y la DIVMS de los ensilados.

6.4.3. Calidad organoléptica de los ensilados

La calidad organoléptica de los ensilados se evaluó mediante una valoración sensorial utilizando la metodología de calificación de la calidad de ensilados propuesto por varios autores (Betancourt *et al.* 2005; Chaverra y Bernal 2001) en una escala de 1 a 4, donde 4

corresponde a una calidad excelente, 3 buena, 2 regular y 1 mala, basado en características organolépticas y sensoriales de olor, color, textura y humedad, descritos en la Tabla 4 de la sección 5.6.2. En la evaluación, se registró la opinión de cinco expertos en ensilados, docentes y trabajadores de la Finca Experimental Santa Lucía de la Universidad Nacional de Costa Rica.

6.5. Análisis de laboratorio

6.5.1. En los forrajes verdes

En la Tabla 6 se detalla los análisis bromatológicos y químicos realizados a los forrajes verdes antes de ensilar.

Tabla 6. Descripción de los análisis bromatológicos y químicos realizados a los forrajes verdes antes de ensilar.

Análisis	Laboratorio	Descripción
Materia Seca (%)	UNA	Eliminación del agua libre por medio de aire caliente en circulación.
Cenizas (%)	UNA	Contenido de minerales en el tejido del forraje.
Proteína cruda (%)	CINA	Contenido de nitrógeno en el tejido del forraje x 6.25
Fibra neutro detergente (%)	CINA	Fracción fibrosa del alimento conformada por hemicelulosa, celulosa, lignina, sílice y proteínas.
Fibra ácido detergente (%)	CINA	Fracción fibrosa del alimento formada por celulosa y lignina.
Lignina (%)	CINA	Parte indigestible contenida en la pared celular.
Extracto Etéreo (%)	CINA	Contenido de grasa bruta en el forraje, contenido energético.
Digestibilidad <i>in vitro</i> de la MS (%)	CINA	Aprovechamiento del alimento en el tracto digestivo del animal.
Azúcares solubles (%)	CINA	Contenido de azúcares solubles en el tejido del forraje.
Capacidad buffer (meq NaOH/kg MS)	CINA	Resistencia que presenta el forraje a reducción del pH.

CINA= Centro de Investigación en Nutrición Animal; UNA= Universidad Nacional de Costa Rica; MS= materia seca; meq NaOH/kg MS= mega equivalente de óxido de sodio por kilogramo de materia seca.

El contenido de MS se determinó por pérdida de peso tras desecar 1 kg de forraje verde en estufa a 60 °C hasta alcanzar un peso constante en la muestra, posterior mente se determinó

materia seca a 105°C con una muestra de 10 gramos durante 24 horas y se determinó el diferencial de peso. El contenido de Ce se obtuvo al incinerar 2.0 g de forraje seco a 550 °C durante 6 horas.

La PC se obtuvo como nitrógeno Kjeldahl x 6.25 mediante el método de macro Kjeldahl (AOAC 1990) con catalizador $\text{CuSO}_4 - \text{K}_2\text{SO}_4$ 3,5 de TECATOR, utilizando 1 ± 0.0001 g de muestra, un digestor DS-20 y equipo de destilación automático.

Los contenidos de FND, FAD y Lig, se determinaron en secuencia mediante el procedimiento propuesto por Van Soest *et al.* (1991). La DIVMS se logró utilizando la técnica de Van Soest (1975). Los AS fueron determinados mediante la técnica AOAC (1984), extrayendo los azúcares en una dilución de etanol y agua. Posteriormente, la solución se analizó mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) para determinando la concentración de los mismos. El EE se determinó extrayendo en un aparato goldfish 2.0 g de forraje seco con éter dietílico anhidro en un dedal de papel de filtro que permita el paso del disolvente, para finalmente recuperar el éter y evaporarlo en baño maría, secar el residuo a 100°C por 30 minutos, enfriar y pesar (Castellanos 1990).

La CB es la cantidad de alcali (meq NaOH/kg MS) que se requiere para reducir el pH en dos unidades (de 6 a 4), después de eliminar los carbohidratos que podrían actuar como tampón, agregando HCL 0.1 N (Playne and McDondald 1996). Para la determinación se utilizó una muestra de forraje verde en su estado original, picada a 1.5 cm y homogenizada. Se extrajo una submuestra de 10 g y se agitó en 250 ml de agua destilada por 2 minutos en un homogeneizador de cuchillas. Se filtró y se determinó valor mediante el valorador automático titrimétrico.

6.5.2. En los ensilados

Finalizado el proceso de fermentación, alrededor de 60 días después de elaborar los silos, se tomó una muestra de 1 kg de ensilado de cada bolsa (silo) a 20 cm de profundidad, las cuales se enviaron al laboratorio para determinar el pH y los contenidos de MS, CE, PC, FND, FAD y Lig, EE y la DIVMS de cada ensilado. El pH se midió en el jugo de los ensilados mediante la utilización de un ph-metro a temperatura ambiente (25 °C), mientras que para la composición química y la DIVMS utilizaron las mismas técnicas descritas para los forrajes verdes.

6.6. Análisis estadístico

Los datos correspondientes al potencial de ensilabilidad de los forrajes, se sometieron a un análisis de varianza utilizando el procedimiento de Análisis Multivariante MLG de SPSS v22 (IBM 2013); mediante un diseño de bloques completos al azar, según el modelo descrito a continuación:

$$y_{ij} = \mu + B_i + E_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

y_{ij} = Variable dependiente

μ = Media

B_i = Bloque de parcelas ($i = 3$)

E_j = Variedad de maíz

ε_{ij} = Varianza residual o término del error

El efecto del proceso del ensilaje sobre calidad nutritiva y el pH de los forrajes fueron analizadas mediante el procedimiento comparación de medias relacionadas en el software de cómputo SPSS (IBM 2013); utilizando un diseño de bloques completos al azar, según el modelo descrito a continuación:

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + V_j + E_k + (VE)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

y_{ijk} = Variable dependiente

μ = Media

B_i = Bloque de parcelas ($i = 3$)

V_j = Variedad de maíz

E_k = Efecto del ensilaje

ε_{ij} = Varianza residual o término del error

En los casos que la fuente de variación resultó significativa ($P \leq 0,05$) se realizó la prueba de Tukey (5%) para la comparación de medias.

Los datos correspondientes a la calidad organoléptica obtenidos mediante la valoración sensorial, se sometieron a un análisis descriptivo resaltando las características de cada ensilado.

6.7. Estimación de los costos de producción

Para estimar el costo por kilogramo de ensilado fresco, materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD), se tomó en cuenta los rendimientos de forraje verde, MS y MSD reportados por Méndez (2017), correspondiente a la primera parte del presente estudio. También se cuantificaron los jornales, las horas de maquinaria y los insumos necesarios para establecer y mantener una hectárea cultivada de maíz, así como los requerimientos de insumos y mano de obra necesaria para ensilar la biomasa producida en dicha área. Posteriormente, el costo total de producción se dividió entre los kilogramos de ensilado producidos por cada variedad mediante la siguiente fórmula:

$$C_{kgE} = \frac{CTP}{KEP}$$

Donde;

CkgE= costo por kilogramo de ensilado (colones)

CTP= Costo total de producción (colones)

KEP= kilogramos de ensilado producidos (kg)

Para el caso de la mano de obra, se utilizó el salario mínimo establecido por el Ministerio de Trabajo y Seguridad Social (2016), mientras que el costo del uso de la maquinaria y de los insumos, se cotizó a un mínimo de tres empresas de la zona que brindan los servicios.

Además, se realizó un análisis de regresión simple entre el rendimiento de biomasa y el costo de producción, según el siguiente modelo:

$$Y = A + bx$$

Donde:

Y = variable dependiente (costo de producción).

a = Intercepto (ordenada de origen).

b = coeficiente de regresión (pendiente en la línea de regresión).

X = variable independiente (producción de biomasa).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Potencial de ensilabilidad

En la Tabla 7 se presentan los parámetros de fermentación de las cuatro variedades de maíz evaluadas antes de ensilar.

Tabla 7. Parámetros de ensilabilidad de cuatro variedades costarricenses de maíz evaluadas en Santa Lucía, Heredia.

Variedad	MS (%)	AS (%)	CB (meq NaOH/100gMS)	CF	Potencial de ensilabilidad
Diamantes	20.5	5.4 a	38.00 a	21.63	Media
EJN2	21.1	3.7 b	35.50 a	21.92	Media
Nutrigrano	21.0	3.8 b	32.67 a	21.94	Media
Proteinta	20.4	5.2 a	19.67 b	22.82	Media
Promedio	20.8	4.5	31.50	22.10	
DS	0.30	0.78	7.06	0.45	
Significancia (P)	0.737	0.037	0.098	0.558	

Letras diferentes entre fila difieren entre sí ($P < 0.05$)

MS= materia seca; AS= azúcares solubles; CB= capacidad buffer; meq NaOH/kg MS= mega equivalente de óxido de sodio por kilogramo de materia seca.; CF= coeficiente de fermentación; DS= desviación estándar; P= probabilidad significancia.

7.1.1. Materia Seca

El contenido MS de los forrajes de maíz osciló entre 20.4 y 21.1%, sin embargo, no se determinaron diferencias significativas ($P= 0,737$) entre las variedades. En el Alto de Ochomogo de Cartago, Boschini y Elizondo (2004), reportan valores inferiores con híbridos (11.6 y 13.3%), pero semejantes con variedades criollas (21%). Situación similar (19.2 %) encontró Sánchez e Hidalgo (2018) al evaluar nueve híbridos de maíz en Pacayas de Cartago. Por el contrario, en otras latitudes, González (1988) reporta valores superiores entre 22.5 y 28%. Misma situación reportan Fuentes *et al.* (2002), Soto *et al.* (2002) y Tadeo *et al.* (2012), quienes encontraron valores entre 25.4 y 44% de MS al evaluar híbridos y variedades de maíz

en Chile y México. Situación semejante encontraron León y Montenegro (2001), quienes indican valores entre 32 y 34.4%.

Es importante tener presente que las diferencias encontradas en el contenido de MS con otros estudios, puede deberse al material de maíz evaluado, edad fenológica de cosecha o a las condiciones ambientales en las cuales, se desarrollaron las evaluaciones.

Los valores obtenidos de MS en el presente estudio son relativamente bajos, tomando en cuenta que un forraje debe tener entre 25 y 35% para evitar las pérdidas de nutrientes por efluentes (Ashbell y Weinberg 2001; Vallejo 1995) y por respiración (McDonald 1981).

Otro aspecto a considerar, es que el alto contenido de humedad antes de ensilar, restringe el proceso de fermentación, causando que tarde mayor tiempo del necesario para que el ensilado se estabilice, afectando negativamente el contenido celular final y la digestibilidad del ensilado (Siebald 1994, Van Vuuren *et al.* 1995). Además, cuando la materia seca es cercana al 20 %, existe un ambiente húmedo que favorece el desarrollo de bacterias Clostridiales, inclusive a pH=4 (Henderson *et al.* 1972, Smetham 1990).

7.1.2. Azúcares solubles

Los contenidos de azúcares solubles (AS) estudiados oscilaron entre 3.7 y 5.5% en base seca, encontrando diferencias significativas ($P= 0,037$) entre las variedades de maíz. Los contenidos de AS de las variedades Proteinta (5.42%) y Los Diamantes 8843 (5.19%) fueron ligeramente superiores ($P= 0.089$) al de EJN2 y Nutrigrano (3.7 y 3,8%, respectivamente).

Los AS es un indicador útil para expresar la aptitud de un forraje para ser ensilado, ya que es el sustrato que permite formar el ácido láctico necesario para reducir el pH e inhibir la actividad de clostridios y fermentaciones secundarias no deseadas (Martínez 2003). El

contenido de AS en la planta completa de maíz lo convierte en un forraje ideal para ser conservado en ensilaje, debido a que por su alta concentración, no se requiere adicionar aditivos mejoradores del proceso (Alaniz 2008).

En la planta de maíz la mayor cantidad de los AS están contenidos en el grano, por lo tanto el contenido de grano es fundamental, pero sólo representa en promedio el 30-35% del rendimiento de materia seca que provee el maíz (Castillo *et al.* 2009).

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente y considerando que un forraje antes de ensilar debe tener entre 6 y 12% de AS (Lancaster 1967; Sánchez 2017; Alaniz 2008), los valores obtenidos en el presente estudio fueron bajos. Esto coincide con el 7.6% reportado por Sánchez (2015) en Ochomogo de Cartago con el mismo cultivo de maíz. La situación es más crítica, cuando se comparan los resultados obtenidos en el presente estudio, con el rango de 12.1 a 23.7% reportado por Martínez *et al.* (2013) para híbridos y variedades de maíz.

Es importante mencionar, que estas diferencias pueden deberse a múltiples causas, ya que la predicción del contenido en azúcares en los forrajes es muy compleja, debido a que, en un día gris y nublado, el contenido en azúcares será inferior a un día claro y soleado, precedido de una noche fría. La temperatura, la intensidad luminosa y la cantidad de lluvia caída durante los días anteriores al corte tienen mayor importancia sobre el contenido en azúcares, que el estado de madurez del cultivo (Guillet, 1984).

7.1.3. Capacidad buffer

La capacidad buffer (CB) osciló entre 19.8 y 38.0 meq NaOH/100 g MS, con tendencia a diferencias significativas ($P=0.098$) entre las variedades, indicando la prueba de comparación de medias, que la variedad Proteinta alcanzó el menor ($P=0.097$) valor de capacidad buffer

(19.67 NaOH/100g MS), en comparación al resto de los materiales, los cuales presentaron valores fluctuantes entre 32.7 y 38.0 NaOH/100 g MS.

En un estudio realizado en Costa Rica (Castillo *et al.* 2009) con maíz asociado con Vignia (*Vigna radiata*), se reportan valores superiores, entre 52 y 75 meq NaOH/100g MS. Aunque probablemente la superioridad, es debida al efecto negativo de la leguminosa, ya que esta clase de plantas, presentan mayor CB que las gramíneas (McDonald *et al.* 1991; Muck *et al.* 1991).

De acuerdo con Martínez (2003), con valores de CB inferiores a 35 meq NaOH/100g MS, es posible lograr la correcta acidificación de la masa forrajera, por lo que se determina que las variedades de maíz evaluadas en este estudio, presentan valores de CB óptimos para ser conservadas mediante la técnica del ensilaje. Lo anterior concuerda con lo indicado por (McDonald *et al.* 1991; Martínez *et al.* 2000), quienes argumentan que en el caso del forraje de maíz, es común encontrar valores significativamente bajos en comparación a otras especies.

Los valores de CB obtenidos en esta investigación, se encuentran dentro del rango de 28.5 y 44.2 meq NaOH/100g MS reportado por McDonald (1981); Shaver *et al.* (1984) en maíz para ensilar. Aunque Chen *et al.* (1994), indica valores mayores (89.8 meq NaOH/100g MS) en maíz cosechado a los 90 días. Dichas variaciones podrían estar asociadas a varios factores como la variedad o híbrido de maíz empleado, al contenido de proteína cruda, manejo del cultivo, edad fenológica de la planta, entre otros.

7.1.4. Coeficiente de fermentación

El coeficiente de fermentación (CF) es un índice del potencial de fermentación que tiene un forraje, el cual se estima relacionando el contenido de MS, AS y la CB del forraje antes de ensilar. En el presente estudio, al relacionar las variables antes indicadas, se encontraron CF entre 21.6 y 22.8, sin diferencias significativas ($P=0.558$) entre las variedades.

Los CF encontrados en el presente estudio son bajos, debido a que el contenido de MS y AS fueron inferiores al 25 y 15%, respectivamente, a pesar de que la CB no superara los 38.0 meq NaOH/100g de MS (Argamentería *et al.* 1997; Martínez 2003).

Es importante mencionar, que a pesar de los bajos contenidos de MS y AS obtenidos en el presente estudio, la adecuada CB permitió reducir el pH a un rango de 3.9 a 4.0, impidiendo el desarrollo de bacterias clostridiales y propiciando un equilibrio rápido en el ensilado.

Por otra parte, Martínez (2013) clasifica al cultivo de maíz como una especie forrajera altamente fermentable, al encontrar valores de CF entre 46.5 y 72.5. Sánchez (2015) también le da al forraje de maíz la misma calificación, al obtener valores de CF entre 24.7 y 27.9 en maíz solo y en asocio con vicia (*Vicia sativa*) en la zona alta de Cartago, respectivamente. En el presente estudio, y tomando en cuenta la edad temprana en que se realizó la cosecha, los bajos contenidos de MS, AS y moderados valores de CF obtenidos, las variedades de maíz evaluadas se clasifican de fermentación intermedia.

7.2. Efecto del proceso del ensilaje sobre la calidad nutricional de los forrajes

La calidad nutricional de los ensilados está determinada principalmente, por la composición química del forraje al momento de la cosecha y por las modificaciones químicas que toman

lugar durante el proceso de ensilaje. Es de esperar que, el valor nutritivo del ensilado sea siempre menor que el del material de origen (Mier 2009).

En la Tabla 8, se presenta la composición química, la digestibilidad *in vitro* de la MS y el pH de los forrajes antes y después de ensilar.

Tabla 8. Calidad nutricional, digestibilidad *in vitro* de la materia seca y pH de variedades de maíz costarricense antes y después de ensilar en Santa Lucía de Heredia.

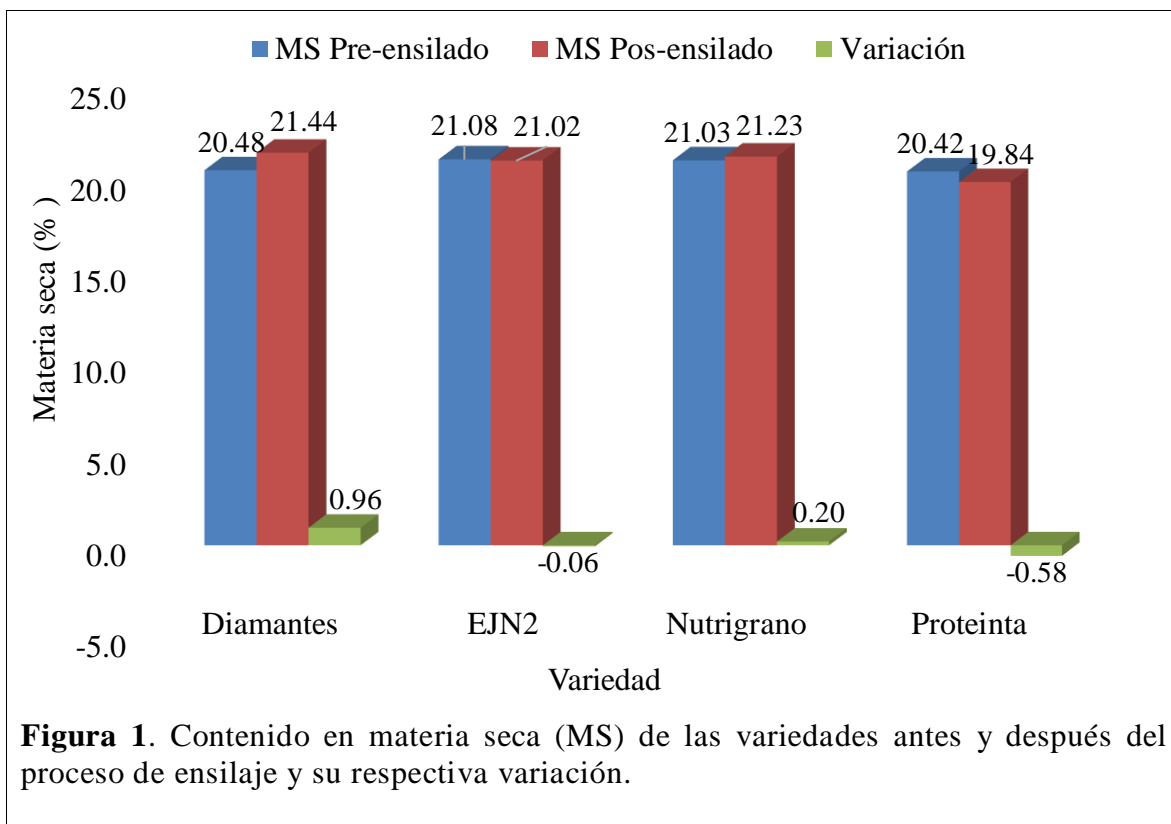
Variables	Pre-ensilaje			Pos-ensilaje			Significancia (P)
	Promedio		D.E.	Promedio		D.E.	
MS	20.80	a	0.85	20.90	a	0.98	0.669
Ce	8.70	a	0.52	10.20	b	0.33	0.001
PC	10.70	a	0.63	10.40	a	0.41	0.055
FND	60.70	a	1.55	56.90	b	0.64	0.001
FAD	33.50	a	1.81	35.50	b	2.66	0.022
Lig	3.00	a	0.38	3.73	b	0.17	0.001
EE	1.90	a	0.09	1.30	b	0.14	0.001
DIVMS	62.20	a	1.76	66.20	b	1.84	0.001
pH	5.66	a	0.29	3.94	b	0.17	0.001

Letras diferentes en cada fila difieren entre sí ($P < 0.05$)

DS= desviación estándar, MS= materia seca; Ce= cenizas; PC= proteína cruda; FND= fibra neutro detergente; FAD= fibra ácido detergente; Lig= lignina; EE= extracto eterio; DIVMS= digestibilidad *in vitro* de la materia seca.

7.2.1. Materia Seca

El contenido de MS de las variedades de maíz no fue afectado significativamente ($P=0.669$) por el proceso del ensilaje, con variaciones que oscilaron entre -0.58 y 0.96 unidades porcentuales (Up). Por otra parte, se encontró que el contenido de MS de los ensilados, no mostraron diferencias significativas ($P=0.180$) entre las variedades, con valores que fluctuaron entre 19.8 ± 0.24 y 21.4 ± 1.25 % (Figura 1).

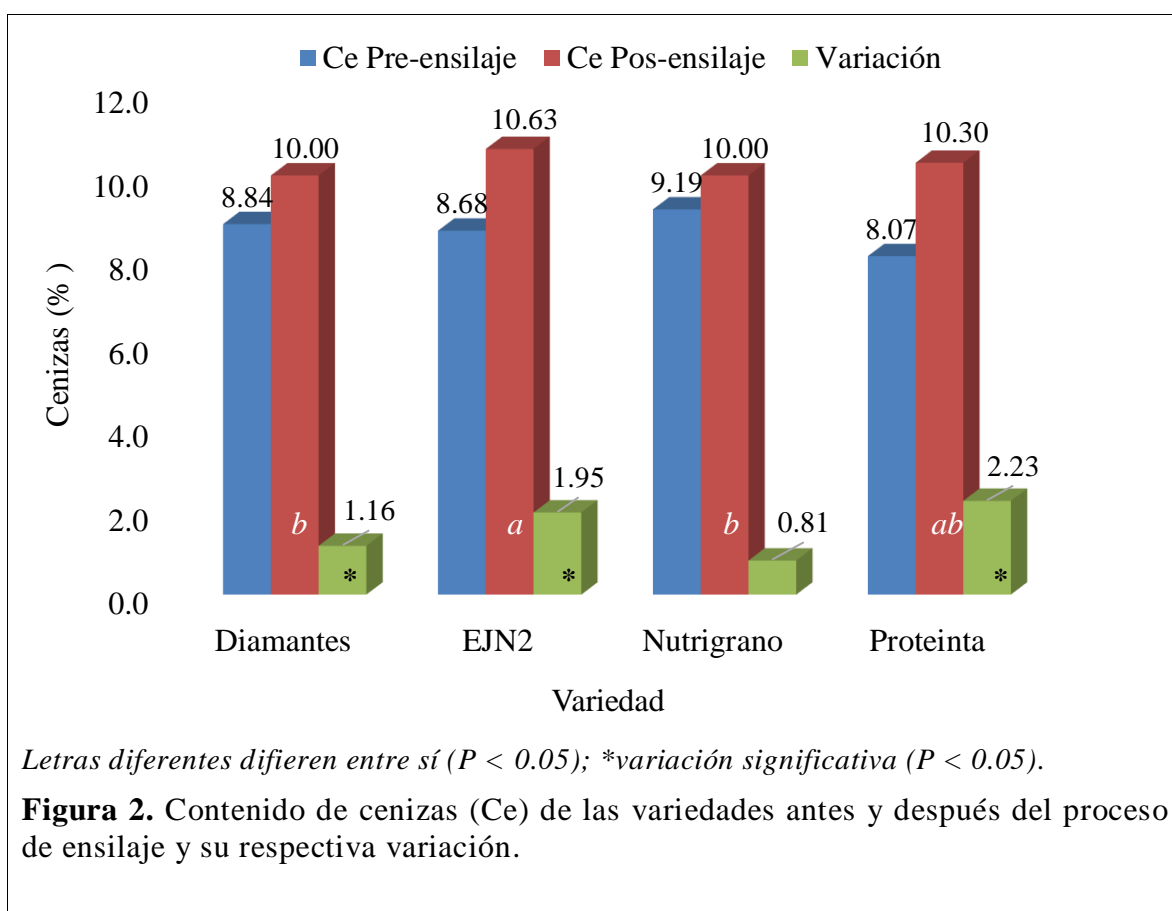


Las variaciones registradas en el contenido de MS son normales, debido a que en el proceso de ensilaje se dan pérdidas de agua, sólidos y gases por medio de efluentes. Es de esperar que cuando el contenido de MS en el forraje verde es alto, las pérdidas por efluentes no existen o son mínimas, solo habrá pérdidas por gases. En este caso, quedará el mismo volumen de agua en menos masa de forraje, aumentando la concentración de agua y disminuyendo el porcentaje de MS. Por lo contrario, cuando el forraje original contiene mucha agua, se producen efluentes al ensilar, disminuyendo la cantidad de agua e incrementando la concentración de MS. Al respecto, Sánchez (2015) determinó una correlación altamente negativa ($r = -0.912$) entre el porcentaje de MS de partida y las variaciones del mismo.

Las variaciones obtenidas en el presente estudio (entre 1.5 y 2.8 Up) fueron menores al rango encontrado por Sánchez (2015), al evaluar cereales y pastos forrajeros en la zona alta de Cartago. También Uriarte (2004) reporta variaciones superiores, entre 5 y 10 Up.

7.2.2. Cenizas

El proceso del ensilaje afectó significativamente ($P < 0.001$) el contenido de cenizas (Ce) de los forrajes, con variaciones que oscilaron entre 0.81 y 2.23 Up. Las variedades Proteinta y EJN2 fueron las que experimentaron los mayores incrementos (2.23 y 1.95 Up, respectivamente); mientras que en la variedad Nutrigrano, el aumento fue más bajo (0.81 Up). En la Figura 2, se presenta el contenido de Ce de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.



Por otra parte, se encontró que el contenido de Ce en los ensilados, varió significativamente ($P = 0.021$) entre las variedades, con valores que oscilaron entre 10.0 ± 0.25 y $10.6 \pm 0.23\%$, indicando la prueba de medias que el contenido de la variedad EJN2 ($10.6 \pm 0.23\%$) fue superior ($P < 0.05$) a la media ($10 \pm 0.25\%$) de Los Diamantes 8843 y Nutrigrano, pero

semejante a Proteinta ($10.30 \pm 0.13\%$), la cual a la vez no difirió significativamente ($P = 0.381$) de las dos anteriores.

De acuerdo con Martínez (2003), es común encontrar incrementos de Ce en un forraje después de ser ensilado, ya que las pérdidas gaseosas solo afectan a la materia orgánica, lo cual contribuye a incrementar la concentración de cenizas en la biomasa total restante del ensilado. Esto coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio, debido a que las variedades que experimentaron mayor incremento de Ce (Proteinta y EJM2) fueron a la vez, las que contenían mayor cantidad de materia orgánica antes de ensilar (91.9 y 91.3%, respectivamente).

Aunque algunos autores (Sibanda *et al.* 1997; Mier 2009) reportan valores de Ce inferiores (entre 5.2 y 6.2%) a los obtenidos en el presente estudio en forraje de maíz. Es importante aclarar que, dichas concentraciones están sujetas a múltiples variables, entre las que se pueden mencionar la variedad o híbrido de maíz, edad fenológica de cosecha, altura de corte, deshidratación del forraje antes de ensilar y la inclusión de aditivos (WingChing 2006).

Para Chaverra y Bernal (2001), el problema sería encontrar contenidos superiores al 12% de Ce, lo cual se asocia a contaminación con suelo durante la cosecha del forraje o elaboración del ensilaje, situación que favorece la presencia de fermentaciones secundarias que reducen la calidad y consumo del ensilado por parte de los animales.

7.2.3. Proteína cruda

El proceso del ensilaje tendió afectar ($P=0.055$) el contenido de PC de los forrajes. Todas las variedades, con excepción de Proteinta, redujeron el contenido de PC entre -0.22 y -0.91 unidades porcentuales al someter el forraje al proceso de ensilaje (Figura 3). Se encontró que la variedad Nutrigrano y Los Diamantes 8843, alcanzaron la mayor y menor variación,

respectivamente. Lo anterior, significa que la proteólisis fue similar en todas las variedades, independientemente del contenido de PC y del potencial de ensilabilidad que presentaba cada forraje inicialmente.

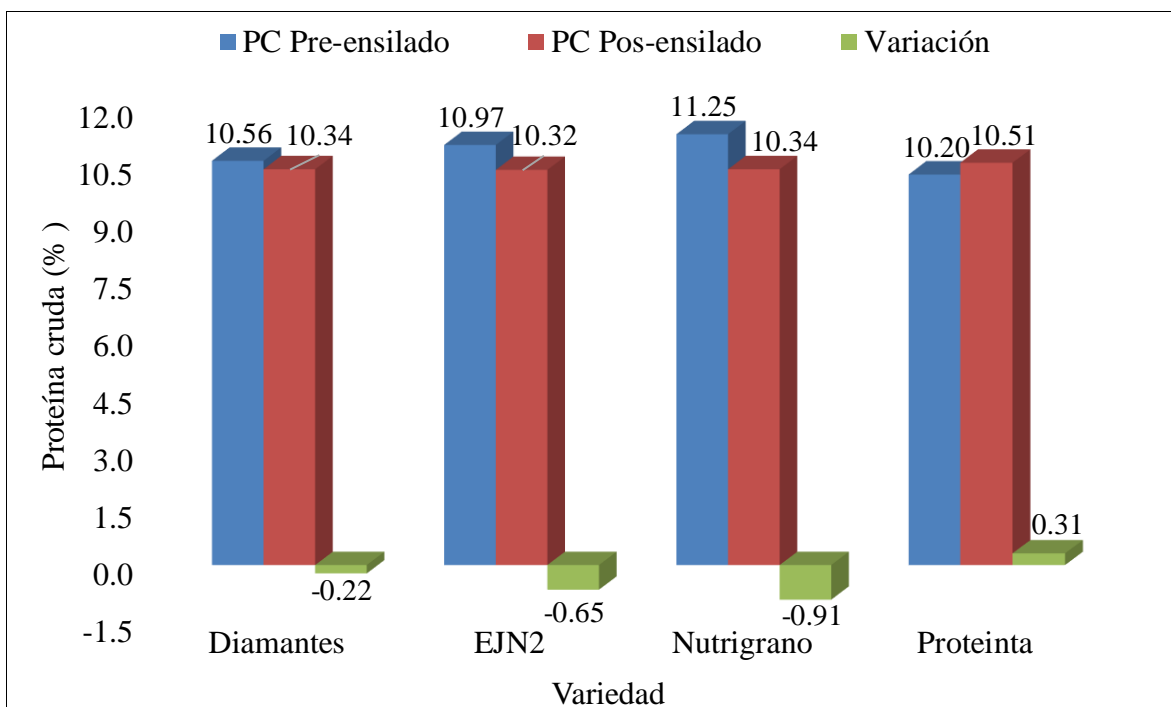


Figura 3. Contenido en proteína cruda (PC) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y su respectiva variación.

Por otra parte, el contenido de PC de los ensilados no mostró diferencias significativas ($P=0.955$) entre las variedades, las cuales alcanzaron valores que oscilaron entre 10.3 ± 0.27 y $10.5 \pm 0.08\%$ (Figura 3).

En un estudio realizado por Sánchez (2015) en la localidad de Cartago, se reportan reducciones semejantes (-0.2 a -1.1 Up) a las encontradas en el presente estudio, al evaluar el proceso de ensilaje en cereales y pastos forrajeros.

Lo anterior, coincide con lo expuesto por Martínez (2003), quien indica que las variaciones en el contenido de PC de un forraje al ser ensilado, dependen del contenido del nutriente en

el forraje original. Entre mayor sea el contenido de proteína en el forraje original, mayor es la proporción de proteína soluble y de nitrógeno no proteico disponible en la masa forrajera, con mayor vulnerabilidad a sufrir procesos degradativos y pérdidas por efluentes. El autor considera que, en los casos en que se registran aumentos del contenido de PC, probablemente se cometieron errores en la medición o en la metodología utilizada en el muestreo.

Según Cárdenas *et al.* (2004), las pérdidas de PC resultan inevitables en el proceso de ensilaje, las cuales se le atribuyen a la proteólisis anaeróbica que ocurre durante el proceso de ensilaje, con la consecuente transformación de proteína en nitrógeno no proteico, principalmente en forma de amoníaco.

7.2.4. Pared Celular

En la Figura 4, se presenta el contenido el contenido de fibra neutro detergente (FND), fibra ácido detergente (FAD) y lignina detergente (Lig) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje, así como las variación encontradas.

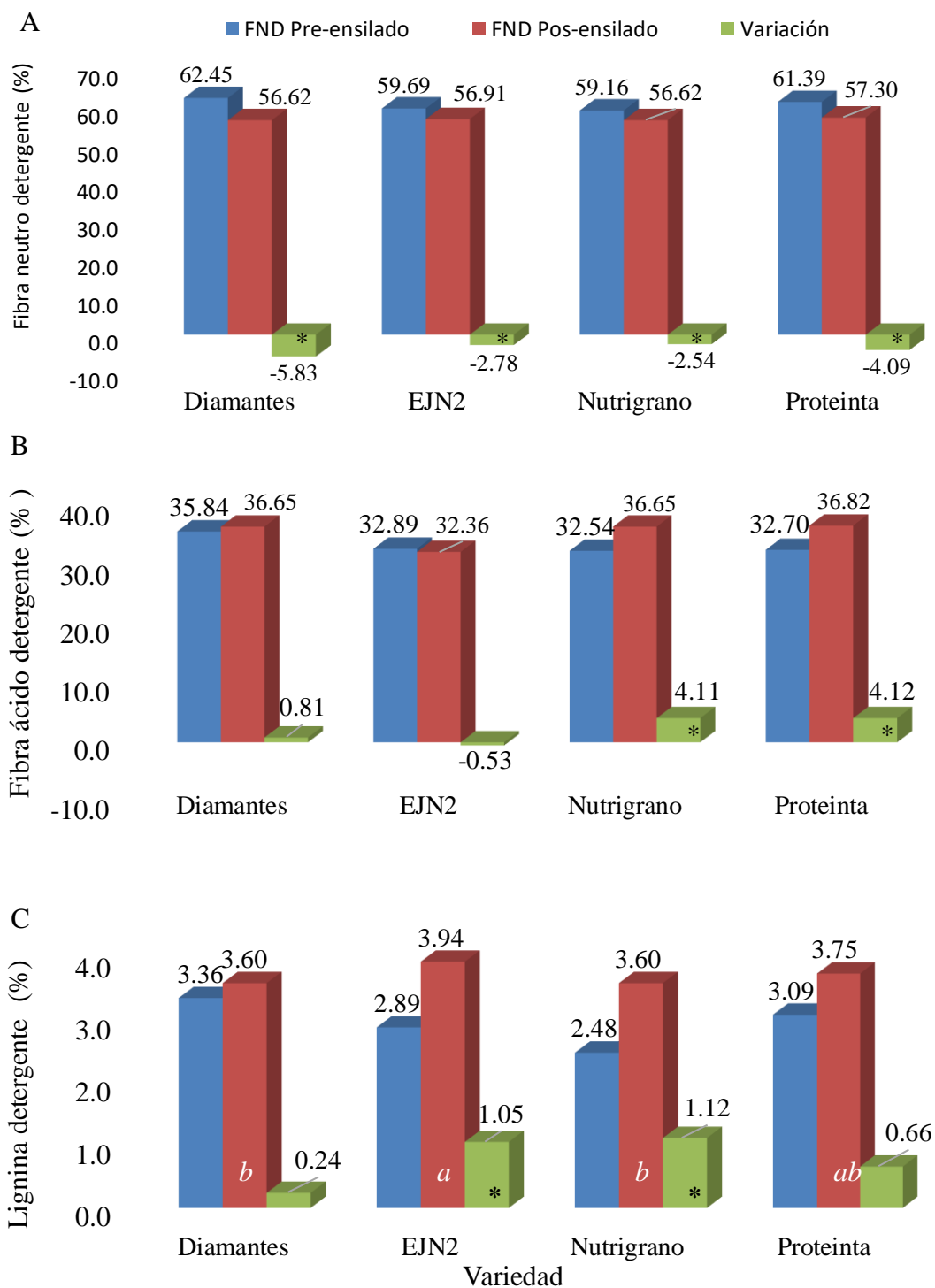


Figura 4. Contenido en fibra detergente neutro, fibra ácido detergente y lignina detergente de las variedades antes y después del proceso de ensilaje y sus respectivas variaciones.

El proceso de ensilaje afectó el contenido de la pared celular, debido a que se redujo la FND ($P=0.001$) e incrementó la FAD ($P=0.022$) y el contenido de la Lig ($P=0.001$). Con respecto a la FND, las reducciones debido al proceso de ensilaje oscilaron entre -2.54 y -5.83 Up, logrando las variedades Los Diamantes 8843 y Proteinta las mayores disminuciones (-5.83 y -4.09 Up); mientras que Nutrigrano y EJN2 los menores descensos (-2.54 y -2.78 Up). Es importante resaltar que, las variedades con mayor contenido de FND en el forraje original, fueron a la vez las que redujeron en mayor proporción dicha fracción después de ser ensiladas (Figura 4 A).

A pesar de lo anterior, el contenido de FND de los ensilados no varió significativamente ($P=0.620$) entre las variedades, las cuales alcanzaron valores entre 56.6 y 57.3%.

Estudios realizados por Eun *et al.* (2007) reportan valores inferiores (43.8%) a los obtenidos en el presente estudio. De igual manera, Kung *et al.* (2008) y McDonald (1981) mencionan valores menores (44.1 y 41.3%, respectivamente). Según Neuman *et al.* (2007) estas diferencias puede deberse a distintos contenidos de FND en los forrajes de origen antes del ensilaje, o a desigualdades en la edad de la cosecha y tamaño de picado.

Como se indicó anteriormente, la fracción de FAD fue afectada ($P=0.022$) por el proceso de ensilaje. Todas las variedades incrementaron el contenido desde 0.81 a 4.12 Up, con excepción de la EJN2 que lo redujo en -0.51 Up. Las variedades Nutrigrano y Proteinta experimentaron el mayor aumento; mientras que, Los Diamantes 8843 el ascenso más bajo (Figura 4 B). Esta tendencia concuerda con la reportada por Boschini y Elizondo (2003), quienes reportan incrementos de FAD al ensilar maíz con morera (*Morus alba*). Esto refleja que las fracciones de celulosa y lignina al finalizar el proceso de fermentación, fueron superiores a las obtenidas en el forraje inicial.

Otros autores (Kung *et al.* 2008; Wohlt 1989; Hoffman 2005; Cubero *et al.* 2010) atribuyen dicho aumento a un efecto en la estabilidad del material fermentado. El aumento se da, porque otras fracciones y componentes no fibrosos de la pared celular se descomponen más rápidamente, permitiendo su disminución e incrementando la FAD.

También se encontró que, el contenido de FAD de los ensilados, no varió significativamente ($P=0.116$) entre las variedades, con valores que oscilaron entre 32.4 y 36.8%. Estos valores son semejantes al rango de 34.6 a 36.8% reportado por Sánchez (2015) en maíz solo y asocia con vicia en la zona alta de Cartago, al igual que los contenidos de 35.7 y 36.8% encontrados por Khorasani *et al.* (1997) y Bhandari *et al.* (2008) en Canadá en la misma especie de forraje. Por otra parte, Boschini y Elizondo (2004) y Elizondo (2011) citan valores ligeramente superiores (39 a 44 %) en el Alto de Ochoмого con híbridos y variedades criollas de maíz, pero Jiménez (2002) encontró valores inferiores (29.6%) con la variedad de maíz ICA 354 en Colombia.

Como se mencionó anteriormente, la fracción de Lig también fue afectada significativamente ($P=0.001$) por el proceso de ensilaje. Todas las variedades experimentaron un incremento en el contenido de Lig, con variaciones que fluctuaron entre 0.24 y 2.48 Up. La Nutrigrano y EJM2, fueron las variedades que aumentaron más el contenido de Lig (1.12 y 1.05 Up, respectivamente); en comparación con las otras dos variedades. Importante anotar que los forrajes que inicialmente contenían menos FND, fueron los que experimentaron mayores cambios en el contenido de Lig.

También se encontró, que el contenido de Lig de los ensilados varió significativamente ($P=0.012$) entre las variedades, indicando la prueba de comparación de medias que la variedad EJM2 alcanzó el mayor valor ($3.94 \pm 0.06\%$) y Los Diamantes y Nutrigrano los

contenidos más bajos ($3.60 \pm 0.14\%$); siendo la Proteína ($3.75 \pm 0.07\%$) semejante a todos los materiales (Figura 4 C).

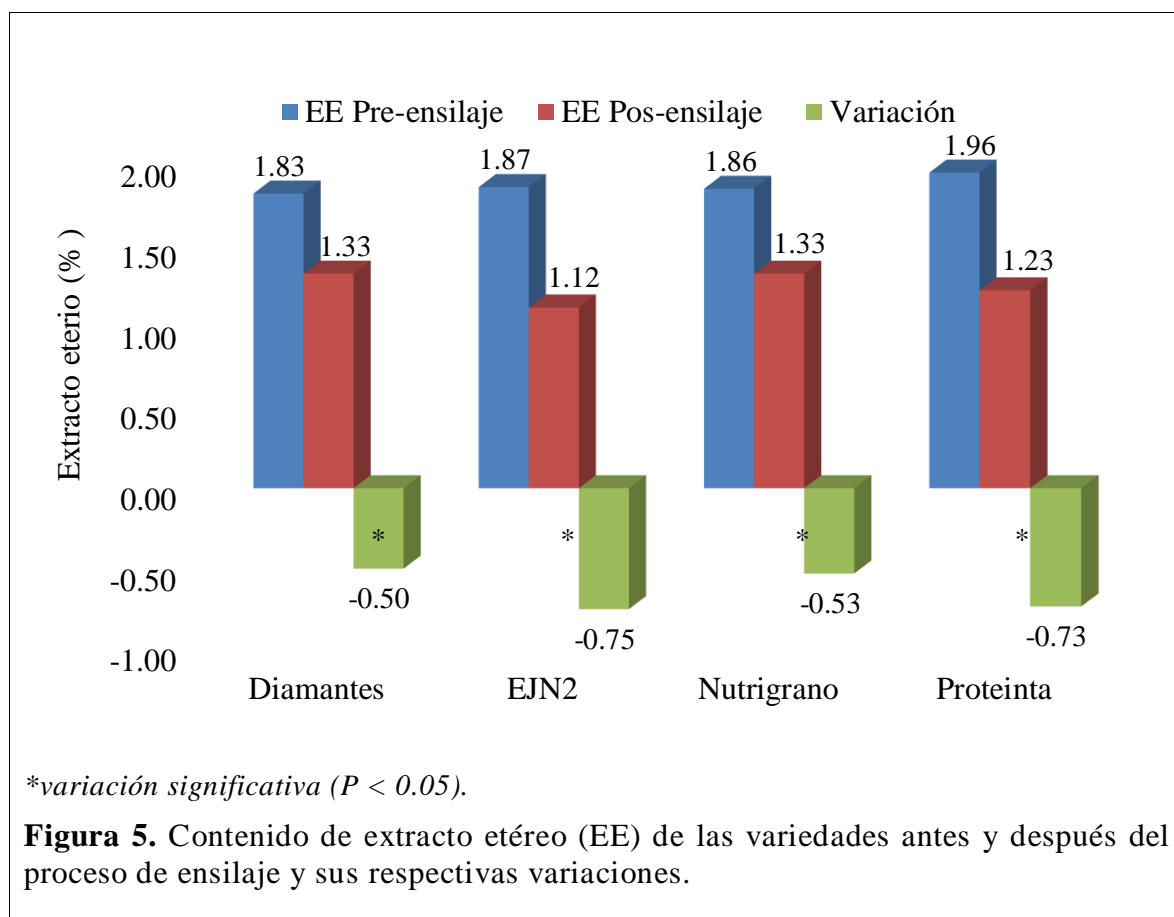
Es importante resaltar, que los cambios en las fracciones de la pared celular, están relacionados con los cambios generados en el contenido de materia seca y materia orgánica de los forrajes, lo que genera que la porción existente de una determinada fracción, se acumule en menor materia seca y orgánica, aumentando su contenido en la biomasa total (Holland *et al.* 1995).

Para comprender los cambios ocurridos en la pared celular durante el proceso de ensilaje, es necesario tener presente que la fracción de la FDN representa la mayoría de los componentes de la misma, tales como hemicelulosa, celulosa y lignina; mientras que, la FDA representa principalmente celulosa y lignina (NRC 2001). Por lo tanto, la disminución de la FDN y el aumento de las otras dos fracciones (FDA y Lig) encontradas en el presente estudio, indica que la hemicelulosa se fermentó, mientras que la celulosa y la lignina no. Estos resultados coinciden con lo reportado por varios autores (Jaurena y Pichard 2001; Phiri *et al.* 2007), quienes indican que en el proceso de ensilaje, es común que la hemicelulosa se hidrolice, aportando monosacáridos al proceso de fermentación; pero la celulosa se fermenta poco (Jaurena y Pichard 2001), siendo relativamente estable a la hidrólisis durante la fermentación (Rezaei *et al.* 2009). De tal manera, que los efectos sobre la FDN y la FDA están relacionados con una mayor fermentación de hemicelulosa y poca de la celulosa.

7.2.5. Extracto Etéreo

El contenido de extracto etéreo (EE), también fue afectado significativamente ($P < 0.001$) durante el proceso de ensilaje, con reducciones que oscilaron entre -0.50 y -0.75 Up. Las variedades EJM2 y Proteína fueron las que mostraron las mayores reducciones (-0.75 y -0.73

Up, respectivamente); mientras que, Los Diamantes 8843 y Nutrigrano alcanzaron las menores disminuciones (-0.50 y -0.53 Up). En la Figura 5, se presenta el contenido de EE de las variedades antes y después del proceso de ensilaje, así como las variaciones encontradas.

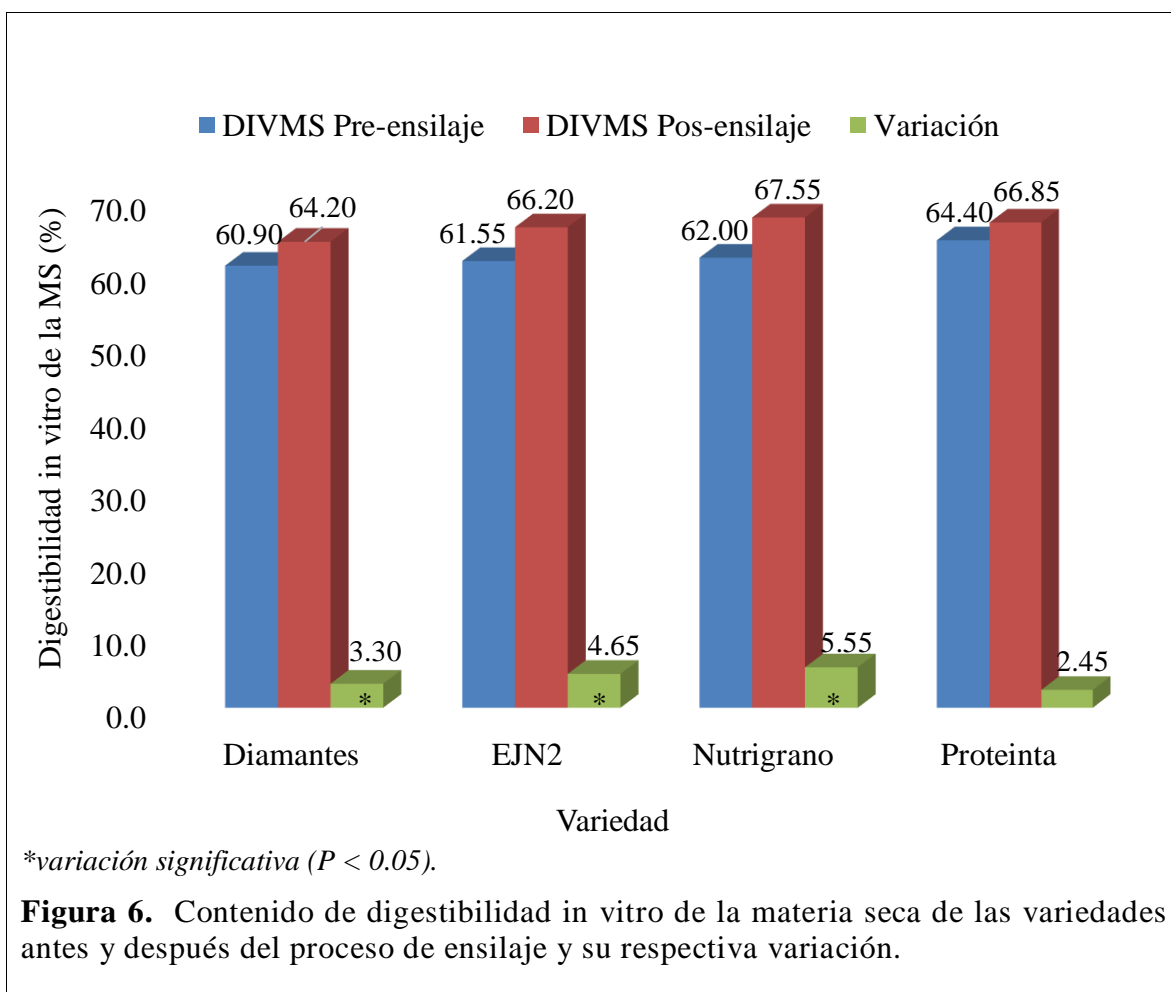


Por otra parte, el EE de los ensilados no mostró diferencias significativas ($P=0.173$) entre las variedades, los cuales alcanzaron valores entre 1.12 y 1.33%. Según Cubero *et al.* (2010), los valores encontrados en el presente estudio, se encuentran dentro del rango normal de la fermentación del forraje de maíz; sin embargo, son ligeramente

inferiores a los valores de 1.55 a 1.97% reportado por Castillo (2009) en el mismo cultivo de maíz.

7.2.6. Digestibilidad *in vitro* de la materia seca

En la Figura 6, se presenta el contenido digestibilidad *in vitro* de la MS (DIVMS) de las variedades antes y después del proceso de ensilaje, así como las variaciones encontradas.



La DIVMS fue afectada significativamente ($P < 0.001$) por el proceso de ensilaje, con incrementos que oscilaron entre 2.5 y 5.6 Up. Las variedades Nutrigrano y EJM2 alcanzaron los mayores aumentos (4.65 y 5.55 Up, respectivamente); mientras que, Proteinta (2.45 Up) y Los Diamantes 8843 (3.30 Up) mostraron los menores incrementos. Estos resultados

concuerdan con lo reportado por Baxter *et al.* (1980) y Di Marco *et al.* (2002), quienes indican que los incrementos de la digestibilidad de un forraje al ensilar resultan normales, lo cual se debe a las pérdidas inevitables de diferentes fracciones de la pared celular que ocurren durante la fermentación.

Por otra parte, se encontró que la DIVMS de los ensilados osciló entre 64.2 y 67.7%, sin diferencias significativas ($P=0.117$) entre las variedades.

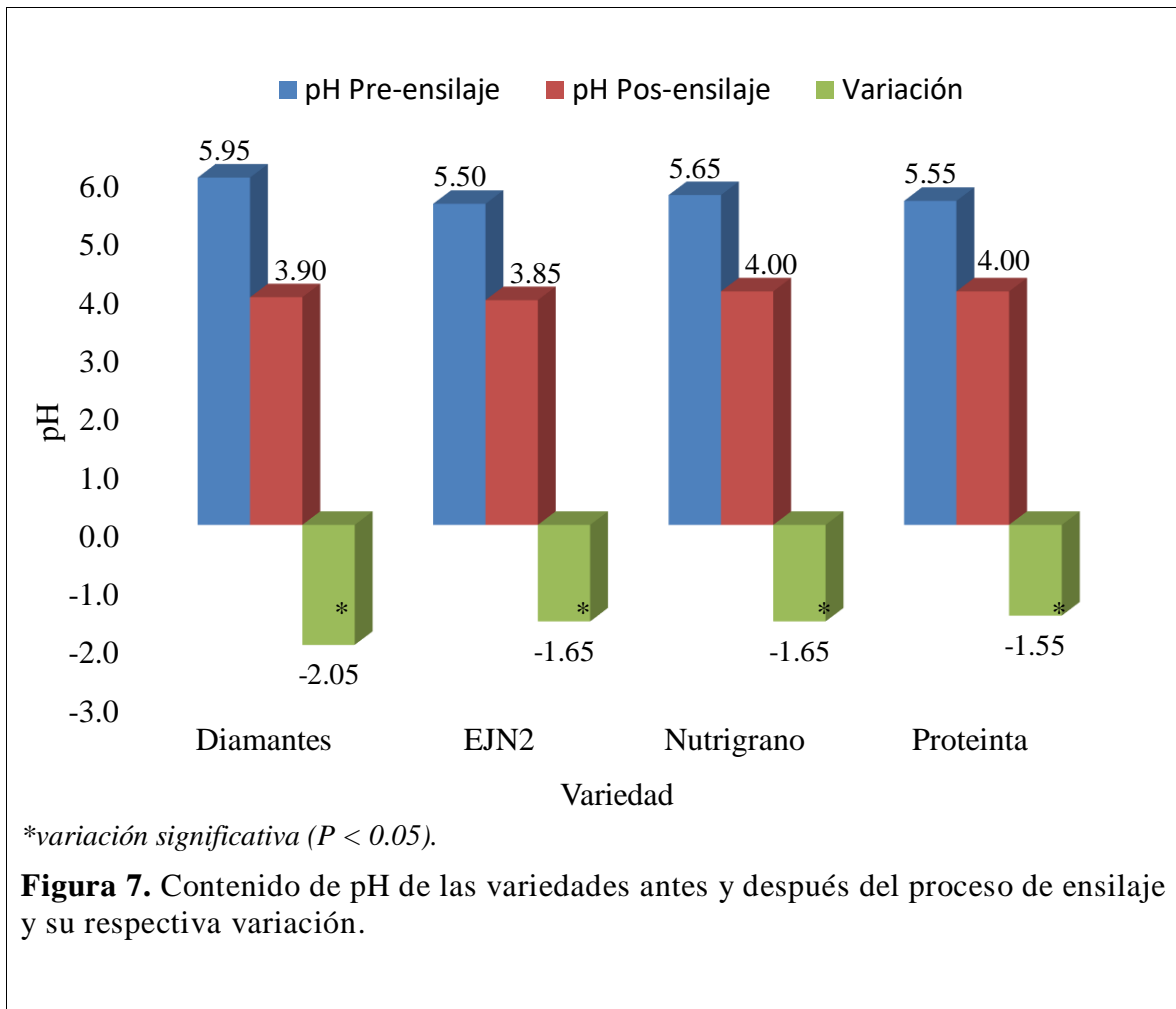
Los datos obtenidos son inferiores al rango de 75 a 86 % reportado por McDonald (1991) en ensilados de maíz. Sin embargo, el autor enfatiza que en el ensilado de maíz, es posible obtener variaciones, debido a que la digestibilidad depende de varios factores, entre ellos la variedad o híbrido utilizado, edad fenológica y altura de corte, así como el periodo de fermentación al que se sometió el forraje.

Quirós (1992) agrega que, la digestibilidad del ensilaje de maíz, también dependerá de la digestibilidad del forraje original y que, las posibles variaciones, se deben a un desequilibrio en la proporción de los componentes estructurales del forraje que se da durante el proceso fermentativo, con respecto a la transformación de la fracción digestible del componente celular.

7.2.7. pH

Como era de esperar, el pH de los forrajes se redujo significativamente ($P < 0.001$) durante el proceso de ensilaje, pasando en promedio de 5.67 ± 0.22 en los forrajes verdes a 3.94 ± 0.08 en los ensilados, equivalente a una reducción de -1.73. Según varios autores (Argamentería *et al.* 1997; De la Roza 2005; Martínez 2003), estas reducciones son normales en el forraje de maíz, lo que favorece la producción de ácido láctico e inhibe el desarrollo de

bacterias *Clostridium*. En la Figura 7, se presenta el pH de los forrajes antes y después del proceso de ensilaje, así como las variaciones encontradas.



Por otra parte, el pH de los ensilados no varió significativamente ($P= 0.687$) entre las variedades, las cuales alcanzaron valores entre 3.85 y 4.00. Todos los ensilados presentaron valores excelentes de pH, ya que fueron inferiores a 4.20 (Mier 2009; Alpízar 2010; Zannier 2012; Martínez 2009).

De acuerdo con Mangado (2006), cuando el pH de un ensilado es bajo, significa que durante la fermentación, predominó la producción de ácido láctico y como consecuencia, prevalece

la adecuada conservación del material. Por lo tanto, los ensilados de la presente investigación se pueden clasificar como de buena calidad (Peña y Del Pozo 1992).

Los valores de pH obtenidos en este trabajo, coinciden con el rango de 3.70 a 4.50 reportados por otros investigadores (Johnson *et al.* 2002; Forouzman *et al.* 2005; Kleinschmit y Kung 2006; Alpízar 2010) en evaluaciones realizadas con ensilados de maíz sin inóculo.

El descenso del pH obtenido en el presente trabajo, es evidencia de que el proceso de ensilaje se llevó a cabo con presencia de bacterias lácticas, las cuales degradan los azúcares solubles y hemicelulosas presentes en el forraje hasta ácido láctico, inhibiendo el crecimiento de bacterias antagónicas, permitiendo que el material permanezca estable, en tanto se mantengan las condiciones de anaerobiosis (McDonald *et al.* 1991).

El adecuado pH obtenido en el presente trabajo, se puede atribuir, entre muchos otros factores, a la baja capacidad buffer que presentaron los forrajes de maíz, lo cual permitió una rápida reducción del pH y producción de ácido láctico, favoreciendo la adecuada fermentación del material forrajero (Sánchez, 2015).

7.3. Calidad organoléptica de los ensilados

La opinión de los expertos acerca de la calidad de los ensilados según la escala de clasificación aplicada (excelente, buena, regular y mala), todos los tratamientos presentaron una calificación excelente en cuanto a olor, color y textura, excepto el contenido de humedad que obtuvo una calificación regular (Figura 8), por lo que el valor consolidado del producto final obtuvo una calificación buena.

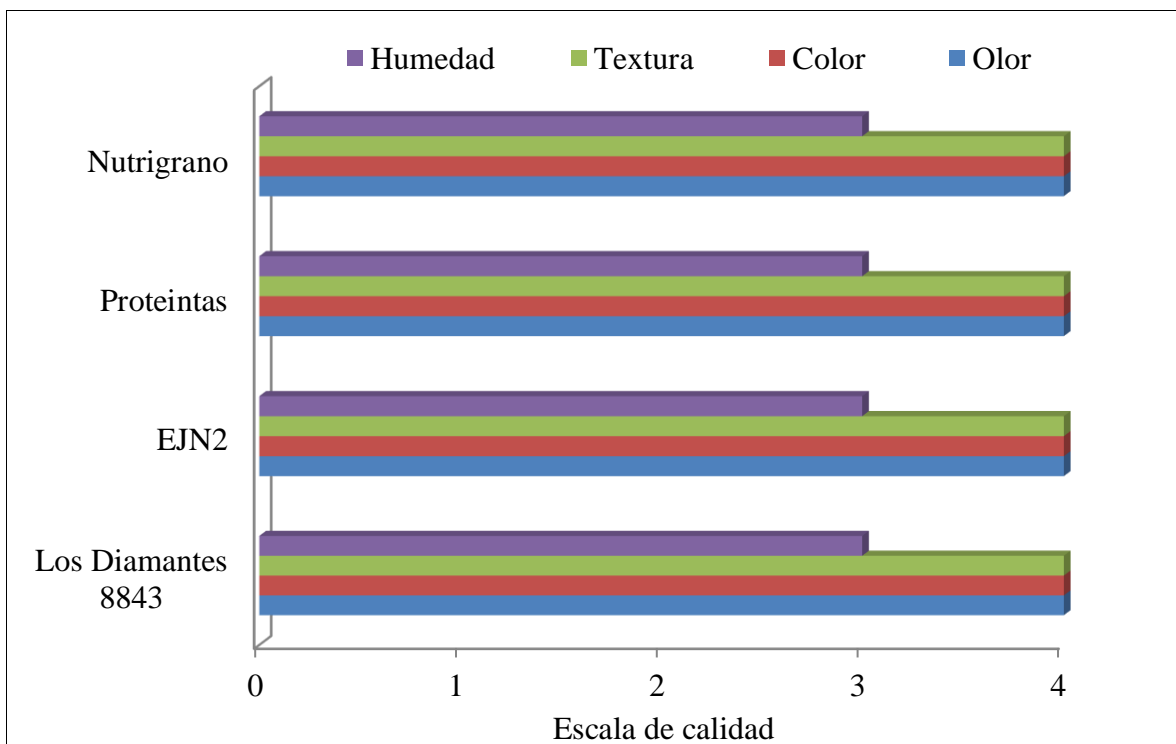


Figura 8. Distribución de las opiniones de los expertos sobre las características organolépticas de los ensilados de cada tratamiento (escala de calidad: 4= excelente, 3= buena, 2= regular y 1= mala).

Según los resultados obtenidos en la presente investigación, resulta importante realizar el proceso del ensilaje cuando el contenido de materia seca del forraje a ensilar sea superior al 25%, esto con el fin de obtener un ensilado de excelente calidad y evitar las pérdidas de nutrientes por efluentes.

7.4. Costos de producción

En el Tabla 9, se presenta el detalle de los costos correspondientes al establecimiento, manejo y elaboración del ensilaje a partir de la biomasa producida en una hectárea de maíz forrajero, así como la contribución a los costos por rubro.

Tabla 9. Costo de establecimiento, manejo y elaboración de ensilaje de una hectárea de maíz con fines forrajeros, en Santa Lucía de Heredia, 2016.

Rubro, actividad e insumo	Cantidad	Unidad	COSTO		Contribución (%)
			€/Unidad	Subtotal (€/ha)	
Maquinaria	-	-	-	67 500	7.1
Pasa de rastra	5	hm	15 000	67 500	
Insumos	-	-	-	624 959	66.0
Herbicida Glifosato	2	l	3 455	6 910	
Herbicidas Atrazina	1	kg	5 400	5 400	
Semilla de maíz	30	kg	2 191	65 730	
Fungicida	2	kg	20 852	31 904	
Fertilizante 10-30-10	458	kg	371	169 918	
Fertilizante K-MAG	67	kg	295	19 765	
Fertilizante Úrea	297	kg	250	74 250	
Insecticida	2	kg	21 090	32 268	
Insecticida	1	l	4 190	4 190	
Combustible diésel	50	l	471	23 550	
Bolsas polietileno (silo)	80	bolsa	4 045	191 074	
Mano de obra	-	-	-	254 552	26.9
Aplicación de herbicidas	18	hh	1 226	22 068	
Siembra a "espeque"	48	hh	1 226	58 848	
Aplicación de fertilizante	18	hh	1 226	22 068	
Aplicación de insecticida	5	hh	1 226	6 130	
Cosecha de forraje	75	hh	1 226	91 950	
Picado del picado	5	hh	1 226	3 257	
Transporte de forraje	2	hh	1 226	2 452	
Carga y descarga forraje	20	hh	1 226	14 478	
Llenado del silo	40	hh	1 226	28 957	
Compactación del forraje	6	hh	1 226	4 344	
TOTAL (€/ha)	-	-	-	947 011	100.0

hm= horas maquinaria; l= litros; kg kilogramo; hh= horas hombres; ha= hectárea.

Se determinó que el costo promedio de ensilar la biomasa producida en una hectárea de maíz fue ₡947 011; de los cuales el 66 y 26.9% corresponde a insumos y mano de obra, respectivamente, el resto de los gastos (7.1%) incluye a la maquinaria utilizada en la preparación del terreno.

En cuanto a los insumos, los costos de los fertilizantes y las bolsas de polietileno utilizadas como silos son los de mayor importancia, debido a que en el mismo orden, aportan el 42.2 y 30.6% (Figura 11), los cuales a la vez son responsables del 27.9 y 20.2% de los costos totales.

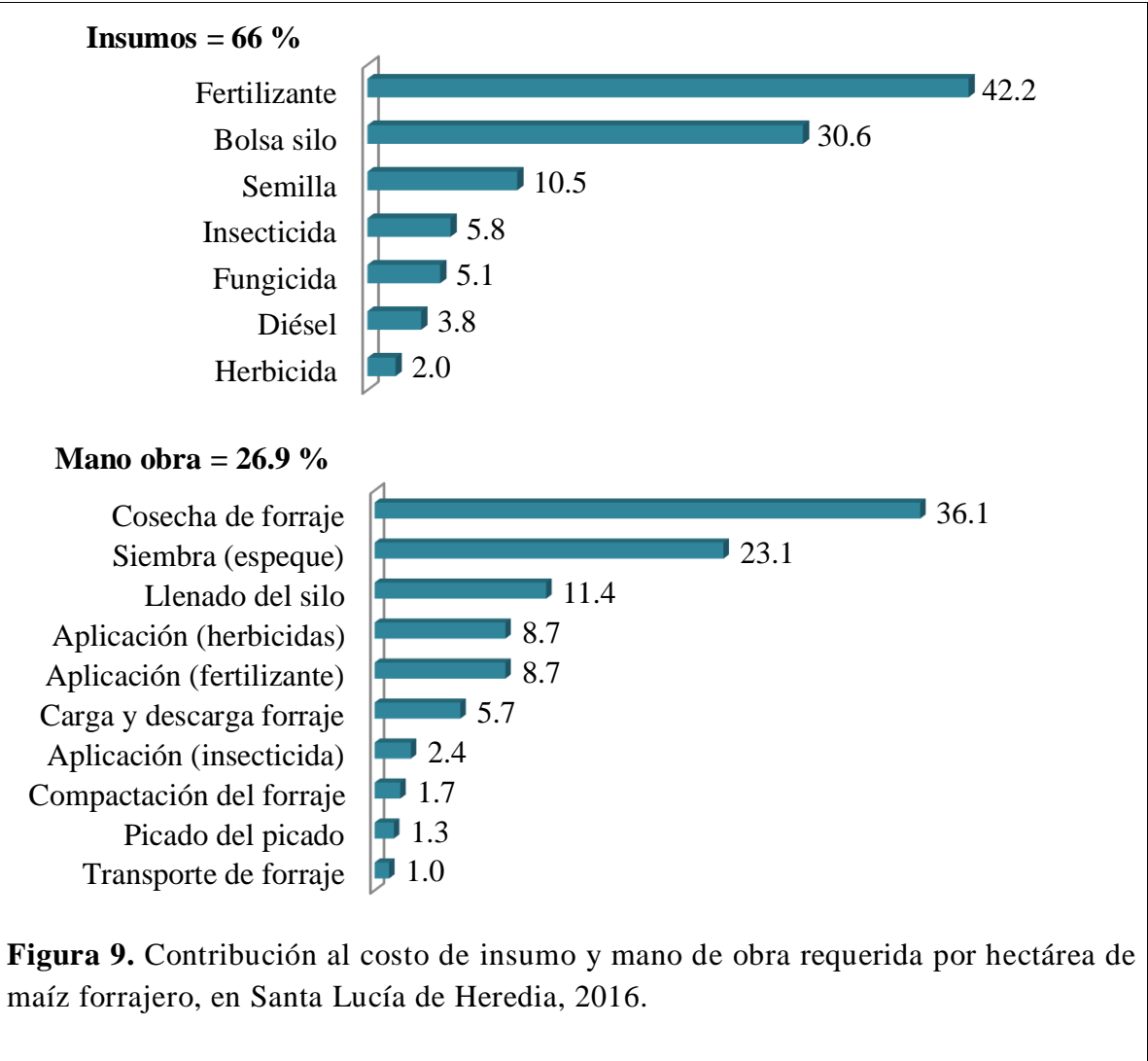


Figura 9. Contribución al costo de insumo y mano de obra requerida por hectárea de maíz forrajero, en Santa Lucía de Heredia, 2016.

Con respecto a la mano de obra, la cosecha del forraje, la siembra y el llenado del silo son las actividades más relevantes, contribuyendo en el mismo orden en el 36.1, 23.1 y 11.4% a los costos correspondientes al rubro de mano de obra, lo que en conjunto aportan el 19% a los costos totales.

En la Tabla 10 se detalla el rendimiento de forraje verde por variedad, así como el costo por hectárea, kilogramo de ensilado fresco, materia seca y materia seca digestible según material.

Tabla 10. Promedio de producción de forraje verde (FV) y costo por kilogramo de ensilado fresco (EF), materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD) en Santa Lucía de Heredia 2016.

Variedad	Costos (¢/ha)	Producción de forraje (kg/ha)			Costos de producción de ensilaje (¢/kg)		
		FV	MS	MSD	EF	MS	MSD
Los Diamantes 8843	992 785	45 177	9 370	6 016	22.0 (4.9)	106.0 (22.9)	165.0 (35.9)
EJN2	980 173	42 951	9 654	6 388	22.8 (4.3)	101.5 (27.7)	153.4 (42.3)
Nutrigrano	935 810	35 122	7 471	5 046	26.6 (5.8)	125.3 (29.8)	185.5 (44.0)
Proteinta	931 490	34 360	7 479	5 001	27.1 (5.5)	124.6 (24.5)	186.3 (36.9)

(DE)= desviación estándar.

El costo por kilogramo de forraje ensilado fresco osciló entre ¢22 y ¢27.1 y el de MS fue de ¢101.5 a ¢125.3, mientras que el de MSD estuvo entre ¢ 153.4 y ¢ 186.3. La variedad Los Diamantes alcanzó el costo más bajo por kilogramo de ensilado fresco (¢22), mientras que la EJN2 por kilogramo de MS (¢101.5) y MSD (¢153.4). Las variedades Nutrigrano y Proteinta lograron los costos más altos, superando en promedio

a las anteriores en ¢4.5, ¢21.2 y ¢26.7 por kilogramo de ensilado fresco, MS y MSD, respectivamente. Esto es consecuente al mayor y menor rendimiento de biomasa obtenida con cada variedad, respectivamente.

En la figura 10 se ilustra la correlación de los costos por kilogramo de MS y MSD con el rendimiento de forraje verde.

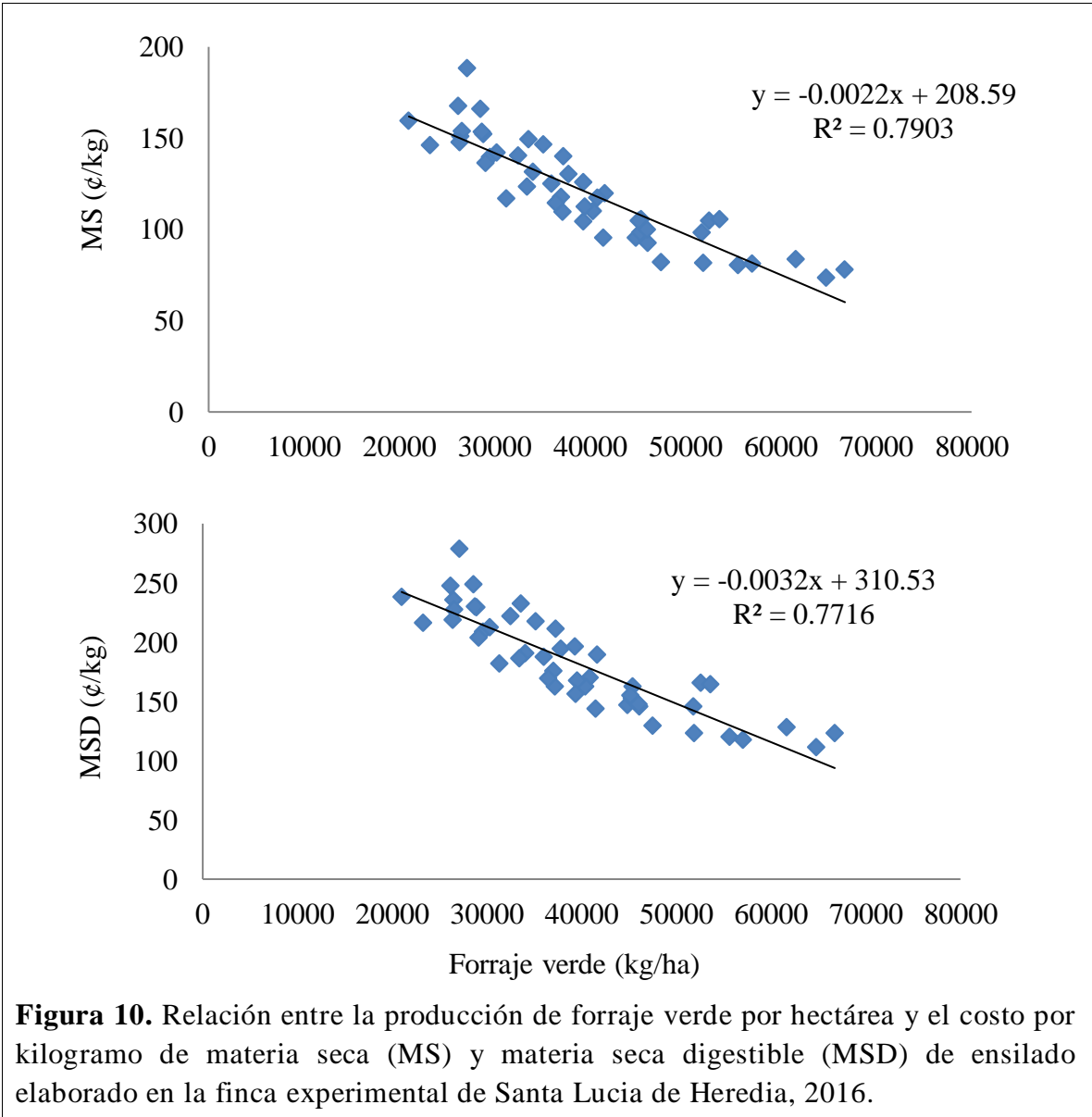


Figura 10. Relación entre la producción de forraje verde por hectárea y el costo por kilogramo de materia seca (MS) y materia seca digestible (MSD) de ensilado elaborado en la finca experimental de Santa Lucía de Heredia, 2016.

Como se observa en la figura anterior, los costos por kilogramo de MS y MSD estuvieron altamente correlacionados de forma negativa ($r = -0.9516$, -0.89 y -0.88 , respectivamente) con el rendimiento de forraje verde, cuando ambas variables se compararon con independencia. Ambos costos se reducen al incrementar el rendimiento de forraje verde por hectárea. En promedio, los costos por kilogramo de ensilado fresco, MS y MSD se incrementan ₡1.5, ₡6.5 y ₡9.6 cuando el rendimiento de forraje verde se reduce un 5%, aunque Eastridge (1999) reporta incrementos de ₡12.2 por kg de forraje fresco cuando el rendimiento se reduce en dicho porcentaje.

Los resultados obtenidos en la presente investigación, concuerdan con lo que reporta Wilkinson (2003), quien indica que, a medida que aumenta el rendimiento de producción de biomasa, manteniendo fijo el costo de producción, baja el costo por unidad de ensilado fresco, materia seca y materia seca digestible. También se encontró, que el costo promedio por kilogramo de ensilado fresco obtenido ($₡ 25.8 \pm 5.6$) se encuentra en el rango ($₡9.1$ y $₡42.9$) reportado por Villalobos *et al.* (2015) en sistemas de lecherías costarricenses.

Por otra parte, se determinó que el costo promedio por kilogramo de MS ensilado fue de $₡120 \pm 127.7$ es superior a los ₡83 reportado por Próspero *et al.* (2013) en ensilado de maíz. Sin embargo, hay que tener presente que dicha diferencia puede deberse a diferencias en el rendimiento de biomasa de los materiales, costos en mano de obra y a la tecnificación utilizada en el proceso, ya que en otros continentes se utilizan híbridos de alto rendimiento y equipo más eficientes que los empleados en Costa Rica.

Los costos de producción también pueden variar por el tipo de silo utilizado, ya que según Villalobos *et al.* (2015) el silo utilizado en la presente investigación (bolsas de polietileno)

es el de mayor costo, lo que indudablemente repercute en el costo por kilogramo de ensilado conservado.

8. CONCLUSIONES

Tomando en consideración las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el presente estudio, se puede formular las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El Potencial de ensilabilidad no varió entre las variedades. Se obtuvo una clasificación de fermentación moderada, debido principalmente al efecto nocivo que ocasiona el alto contenido de humedad presente en los forrajes al momento de la cosecha.
- El alto contenido de humedad en la biomasa al momento de la cosecha, fue debió a que los forrajes se cosecharon en estado fenológico de grano lechoso y no pastoso, cuando todas las partes de la planta aun contenían gran cantidad de agua.
- Las variedades de maíz evaluadas obtuvieron valores óptimos de capacidad buffer, lo que permitió el rápido descenso del pH de la masa forrajera, hasta alcanzar valores excelentes que oscilaron entre 3.85 y 4.0.
- El proceso del ensilaje generó efectos positivos y negativos sobre la composición química y calidad nutricional del forraje conservado. La materia seca y proteína cruda no fueron afectados significativamente por el proceso, mientras que la FND y el EE se redujeron, pero la FAD y DIVMS incrementaron.
- El contenido de materia seca, proteína cruda, FND, FAD, EE, DIVMS y el pH no vario entre los ensilados, mientras que las cenizas y la lignina fueron mayores en la EJM2 y Proteinta en comparación al resto de las variedades de maíz.
- A pesar de los bajos contenidos de materia seca y azúcares solubles obtenidos con las variedades de maíz evaluadas, los forrajes experimentaron una buena fermentación, lo que se logró identificar con el excelente olor, color, textura y pH alcanzados por los ensilados.

- El costo de los fertilizantes y el de las bolsas de polietileno, y la mano de obra requerida en la siembra y la cosecha del forraje, fueron los principales contribuyentes al costo total por hectárea, los cuales en conjunto aportaron el 64% del costo total de la biomasa producida y ensilada.
- El costo de producción por kilogramo de forraje presentó relación negativa con la producción de biomasa por unidad de superficie, es decir, a mayor rendimiento, menor costo por kilogramo de forraje conservado.
- Las variedades EJN2 y Los Diamantes 8843 alcanzaron los menores costos de producción por kilogramo de forraje fresco, materia seca y materia seca digestible, los cuales en promedio y en el mismo orden, fueron 20, 20, 17% inferiores a los costos alcanzados con las otras variedades.
- En términos generales, la composición química, el potencial de ensilabilidad y la calidad organoléptica no varió entre los ensilados, sin embargo, el costo de producción con las variedades EJN2 y Los Diamantes fue menor debido a su mayor producción de biomasa.

9. RECOMENDACIONES

- Con el fin de incrementar el contenido de materia seca de la biomasa total de las variedades de maíz evaluadas, se recomienda cosechar el forraje a edad fenológica de grano pastoso (línea de leche).
- En caso necesario, se recomienda realizar un pre marchitamiento de los forrajes antes de ensilar, con el fin de mejorar el contenido de materia seca y aumentar el potencial de ensilabilidad de los mismos.
- Se recomienda utilizar la variedad EJN2 y Los Diamantes 8843 como recurso forrajero en los sistemas ganaderos ubicados en condiciones agroecológicas semejantes a la zona donde se llevó a cabo el estudio, debido a la buena calidad nutritiva, excelente pH y calidad organoléptica alcanzada por los materiales después de que fueron ensilados. Además, de sus menores costos por kilogramo de ensilado fresco, materia seca y materia seca digestible.
- Se recomienda evaluar los costos de elaboración de ensilado utilizando otros tipos de silo como el de montón y trinchera, ya que el valor de las bolsas de polietileno representa el 30.6 y 20.2% de la compra de insumos y de los costos totales, respectivamente.
- Se recomienda evaluar la fertilización orgánica con estiércol bovino producida en la misma finca, con el fin de reducir el uso de fertilizantes químicos, los cuales además de contaminar los recursos naturales, son responsables del 42.2% de la compra de insumos y del 27.9% de los gastos totales.

10. LITERATURA CITADA

- Aguilera, A; Pérez, F; Grande, D; De La Cruz, I; Juárez, J. 2008. Digestibility and fermentative characteristics of mango, lemon and corn stover silages with or without addition of molasses and urea. *Small Ruminant Research*, 26:87 - 91.
- Alaniz, O. 2008. Adición de residuo de la industria cervecera al ensilaje de maíz como alternativa de forraje para ganado. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el desarrollo Regional Durango. p. 1-35.
- Alltech. 2003. Los 10 Mandamientos del Ensilaje. *Acontecer Lechero* Vol. II. No 15. México DF.
- Alpizar, A. 2010. Efecto de la incorporación de diferentes niveles de morera (*Morus alba*), en el ensilaje de sorgo (*Sorghum almum*) sobre la calidad nutricional y el costo por kilogramo de materia seca digestible. Tesis de licenciatura. Heredia, CR, Universidad Nacional. 110p.
- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 1984. Official methods of analysis. 13th edition. Washington D.C. EUA.
- AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 1990. Official methods of analysis. 15th ed. Arlington V.A. USA. Association of Official Agricultural Chemist. 1140 p.
- Argamentería, A; Rosa, B; Martínez, A; Sánchez, L; Martínez, A; 1997. El ensilado en Asturias. Ed. Servicio de publicaciones del principado de Asturias. Consejería de Agricultura Principado de Asturias. España. 127 pp.
- Ashbell, G; Weinberg, ZG. 2001. Ensilaje de cereales y cultivos forrajeros en el trópico. Memorias de la conferencia electrónica de la FAO sobre el ensilaje en los trópicos. Estudio FAO producción y protección vegetal 161:111-119.
- Baxter, H; Montgomery M; Owen J. 1980. Digestibility and feeding value of corn silage fed with boot stage wheat silage and alfalfa silage. *Journal Dairy Science* 63(2):255-261.

- Bertoia, L. M. 2004. Algunos conceptos sobre ensilaje. Secretaría de agricultura Laboratorio, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora. Buenos Aires, Argentina.
- Bertsch, F. 1995. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica, ACCS. 157 p.
- Betancourt M., Gonzalez I., Martínez M. 2005. Evaluación de la calidad de los ensilajes. Revista Digital Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Venezuela. Aragua, Venezuela. No 8. 1-5 p.
- Bhandari, S. K; Li, S; Ominski, K; Wittenberg, K. M; Plaizier, J. C. 2008. Effects of the chop lengths of alfalfa silage and oat silage on feed intake, milk production, feeding behavior, and rumen fermentation of dairy cows. J. Dairy Sci. 91:1942- 1958.
- Bonilla, N. 2009a. Manual de recomendaciones. Cultivo de maíz. INTA. Costa Rica. 9 p
- Bonilla, N. 2009b. Variedad de Maíz: Proteinta, Diamantes 8843, Nutrigrano, EJM2. Proyecto granos básicos. INTA. Costa Rica.
- Boschini, C.; Elizondo, J. 2004. Desarrollo productivo y cualitativo de maíz híbrido para ensilar. Agron. Mesoam. 15: 31-37.
- Boschini, C; Elizondo, J. 2003. Serie agrotecnológica No. 1. Curso teórico y práctico de ensilaje de forraje. Editorial de la Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 69 p.
- Cajarville, C; Britos, A; Caramelli, A; Antúnez, M; Zanoniani, R; Boggiano, P; Repetto, J. 2007. El horario de corte y el tipo de metabolismo fotosintético afectan la relación azúcares/nitrógeno de las pasturas. Departamento de Nutrición Animal, Facultad de Veterinaria, Montevideo, Uruguay. p. 2-5.
- Cañete, M.V; Sancha J.L. 1998. Ensilado de forrajes y su empleo en la alimentación de rumiantes. Editorial Mundiprensa Libros. Madrid, España. 260 pp.
- Cárdenas, J. V; Solorio, F. J; Saldoval, C. A. 2004. Ensilaje de forrajes: alternativa para la alimentación de rumiantes en el trópico. México: Universidad Autónoma de Yucatán.

- Castellanos, RA; Llamas, LG; Shimada A. 1990. Manual de Técnicas de Investigación en Ruminología. México 1990. pp. 29-34
- Castillo, M; Rojas, A; WingChing, R. 2009. Valor nutricional del ensilaje de maíz cultivado en asocio con vigna (*Vigna radiata*) Agronomía Costarricense, 33: 133-146
- Cevallos, D. 2005. Utilización de ensilaje de residuos agroindustriales y biológicamente acelerado en la alimentación de terneros de levante. Tesis Lic. Ing. Agr. Ecuador. 108pp.
- Chaverra, H; Bernal, J. 2001. El ensilaje en la alimentación del ganado vacuno. Tercer mundo Editores. IICA. Bogotá, Colombia.
- Chen, J; Stokes, M; Wallace, C. 1994. Effects of enzyme-inoculant. Systems on preservation and nutritive value of haycrop and corn silages. Journal Dairy Science 77(2):501-512.
- CNPL (Cámara Nacional de Productores de Leche de Costa Rica). 2015. Boletín informativo. <http://www.proleche.com>. Consultado el 1 de setiembre de 2015.
- CNPL (Cámara Nacional de Productores de Leche de Costa Rica). 2013. Situación actual y perspectivas del sector lácteo costarricense. (en línea). Consultado el 20 mayo 2015. Disponible en http://www.proleche.com/recursos/documentos/congreso2013/Situacion_actual_y_perspectivas_del_sector_lacteo_a_nivel_nacional_Vision_de_la_Camara_Lic_Jorge_Manuel_Gonzalez_Echeverria_Costa_Rica.pdf
- Cubero, J.F; A. Rojas; R. WingChing. 2010. Uso del inóculo microbial elaborado en finca en ensilaje de maíz (*Zea mays*). Valor nutricional y fermentativo. Agronomía Costarricense 34(2):237-250.
- De la Roza, B. 2005. El ensilado en zonas húmedas y sus indicadores de calidad. IV Jornadas de alimentación animal. Laboratorio de Mouriscade. Lalín, Pontevedra. 1-20 pp.

- De la Roza, B; Martínez, A; Modroño, S. 1996. Determination of the quality of fresh silage by near infrared reflectance spectroscopy. Ed. Davies A.M.C, United Kingdom 661-665 pp.
- Di Marco, N., Aello, S. 2002. Costo energético de la actividad de vacunos en pastoreo y su efecto en la producción. En: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), www.anterior.inta.gob.ar/f/?url=http://anterior.inta.gob.ar/balcarce/info/documentos/ganaderia/bovinos/nutricion/costo_energ.htm. Consultado el 23 de Agosto de 2016.
- Eastridge, M. 1999. Brown Midrib Corn Silage. Tri-State Nutrition Conference Proceedings: 178-189.
- Elizondo, J. 2011. Influencia de la variedad y altura de cosecha sobre el rendimiento y valor nutritivo de maíz para ensilaje. *Agronomía Costarricense*, 35: 105-111.
- Eun, J; Beauchemin, K; Schulze, H. 2007. Use of exogenous fibrolytic enzymes to enhance in vitro fermentation of alfalfa hay and corn silage. *Journal Dairy Science* 90(3):1440-1451
- Fernández, A. 1999. El silaje y los procesos fermentativos. Ed. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Buenos Aires, Argentina. 1: 4-11.
- Filippi, R. 2011. Conceptos básicos en la elaboración de ensilajes. Universidad de la Frontera. Chile. 1 - 9 p.
- Forouzmand, M; Ghorbani, G; Alikhani, M. 2005. Influence of hybrid and maturity on the nutritional value of corn silage for lactating dairy cows. *Pakistan Journal of Nutrition* 4(6):435-441.
- Fuentes, J., Cruz, A., Castro, L., Gloria, G., Rodríguez, S., y Ortíz, B. 2001. Evaluación de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays L.*) para ensilar. *Agronomía Mesoamericana*, 12: 193-197.
- Garriz, M; López, A. 2002. Suplementación con nitrógeno no proteico en rumiantes (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 11 de Nov. 2017. Disponible en <http://www.produccion->

animal.com.ar/informacion_tecnica/suplementacion_proteica_y_con_nitrogeno_no_proteico/07-suplementacion_con_nitrogeno.pdf

- González J. 1988. Evaluación de la elaboración del ensilaje de maíz en cinco fincas del cantón de Alfaro Ruiz. Tesis de licenciatura. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 50 pp.
- Guillet, M. 1984. Las gramíneas forrajeras. Ed. Acribia. Zaragoza, España. 355 pp
- Haigh, P. M. 1990. Effect of herbage water soluble carbohydrate content and weather conditions at ensilage on the fermentation of grass silages made on comercial farms. *Grass and Forage Science*. 45:263-271.
- Henderson, AR; McDonald, P; Woolford, MK. 1972. Chemical changes and losses during the ensilage of wilted grass treated with formic acid. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 23:1079-1087.
- Hoffman, P. 2005. Ash content of forages. College of Agricultural & Life Sciences. University of Winsconsin. USA. *Focus on Forage* 7(1): 2 p.
- Holdridge, L. 1979. Ecología basada en zonas de vida, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica. 216p.
- Holland, C; Kezar, W; Quade, Z. 1995. The pioneer forage manual. A nutritional guide. Pioneer Hi-Bred International. Iowa, U.S.A. 40 p.
- IBM Corp. Released 2013. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 22.0. Armonk, NY: IBM Corp.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2014. Boletín Meteorológico. San José, Costa Rica. Consultado 12 de Enero 2017. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>.
- IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2015. Boletín Meteorológico. San José, Costa Rica. Consultado 12 de Enero 2017. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/boletin-meteorologico>

- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censo). 2014. VI Censo Nacional Agropecuario, importancia y uso. San José, Costa Rica. <http://www.inec.go.cr/A/MS/Censos/Censo%20Agropecuario/Methodolog%C3%ADa/02.%20Importancia%20y%20usos%20CENAGRO.pdf>. Consultado el 25 de junio 2015.
- Jaurena, G; Pichard, G; 2001. Contribution of storage and structural polysaccharides to the fermentation process and nutritive value of Lucerne ensiled alones or mixed with cereal grains. *Animal Feed Science and Technology* 92(3): 159-173.
- Jiménez, F; Moreno, J. 2002. El ensilaje, una alternativa para la conservación de forrajes. Ministerio de Agricultura y desarrollo social. Corporación colombiana de investigación agropecuaria. Bucaramanga, Colombia. 26 pp.
- Jobim, CC; Nussio, L; Reis, R; Schmidt, P. 2007. Avances metodológicos en la calidad de forrajes ensilados. *Revista Brasileña de Zootecnia* 36:101-119.
- Johnson, L; Harrison, J; Davidson, D; Robutti, J; Swift, M. 2002. Corn silage management I: Effect of hybrid, maturity, and mechanical processing on chemical and physical characteristics. *Journal of Dairy Science* 85(4):833-853.
- Khorasani, G. R; Jedel, P. E.; Helm, J. H.; Kennelly, J. J. 1997. Influence of stage of maturity on yield components and chemical composition of cereal grain silages. *Can. J. Anim. Sci.* 77: 259 - 267.
- Kleinschmit, D; Kung, L. 2006. A meta-analysis of the effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of corn and grass and small-grain silages. *Journal of Dairy Science* 89(10):4005-4013.
- Kung, L; Moulder, B; Mulrooney, C; Teller, R; Schmidt, R. 2008. The effects of silage cutting height on the nutritive value of a normal corn silage hybrid compared with brown midrib corn silage fed to lactating cows. *Journal Dairy Science* 91(4):1451-1457.
- Lancaster, RJ. 1967. Silage: The research viewpoint. *Proceedings of the New Zeland Grassland Association* 28:154-162.

- León, B; Montenegro A. 2001. Sistema de cultivo de maíz asociado con soya para la elaboración de ensilaje. Tesis de licenciatura. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 90 p.
- MAG (Ministerio de Agricultura Y Ganadería CR). 2010. Estudio del estado de la producción sostenible y propuesta de mecanismos permanentes para el fomento de la producción sostenible. Consultoría SP-12-2009. GFA Consulting Group S.A. 417 pp.
- Maiztegui, J. 2000. Los Alimentos. Facultad de ciencias veterinarias, Departamento de rumiantes. Universidad Nacional del Litoral, Argentina, 18 p.
- Mangado, J. 2006. Como realizar correctamente el ensilaje de maíz. Revista AFIGRA 64:56-62.
- Mannetje, L. 2001. Silage making in the tropics with reference on smallholders. FAO Plant production and protection paper No 161, 180 pp. Food and Agriculture Organization of United Nations, Rome.
- Marais, JP. 2001. Factors affecting the nutritive values of kikuyu grass (*Pennisetum clandestinum*) a review. Tropical Grasslands 35: 65-84
- Martínez, A. 1994. Evolución de la aptitud para ensilar de las especies pratenses: *Lolium perenne*, *Lolium multiflorum* y *Dactylis glomerata*. Seminario de investigación. Departamento de Biología de Organismos y Sistemas. Universidad de Oviedo. España. 25 pp.
- Martínez, A. 2003. Ensilabilidad de especies pratenses en Asturias y su interacción con el uso de aditivos. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo, España. 450 pp.
- Martínez, A; Argamentería, A; De la Roza, B. 2000. Obtención de un forraje equilibrado en energía y proteína mediante la asociación maíz-leguminosa forrajera. En: *Actas de la III Reunión Ibérica de Pastos y Forrajes*. Portugal-España. 335-361.
- Martínez, A; De la Roza, B; Fernández, O. 1999. Nuevas técnicas para determinar la calidad de los ensilados. Tecnología Agroalimentaria. Pastos y Forrajes. Edición especial. CIATA. 48 p.

- McDonald, P; Edwards, RA; Greenhalgh, JFD. 1981. Hierba y cultivos forrajeros. En: Nutrición Animal. Ed.: Longman Group Limited. UK. 384-398.
- McDonald, P; Henderson, A.R; Heron, S.J. 1991. The biochemistry of silage. Ed.: Chalcombe Publications. UK. 340 pp.
- McGrath, D. 1992. A note on the influence of nitrogen application and time of cutting on water soluble carbohydrate production by Italian ryegrass. Irish Journal of Agricultural and Food Research 31:189-192.
- Méndez, I. 2017. Potencial forrajero de cuatro variedades de maíz (*Zea mays*) evaluadas a diferentes densidades de siembra en Santa Lucía, Barva de Heredia. Tesis de licenciatura. Heredia, Costa Rica. Universidad Nacional de Costa Rica. 192 p.
- Mier, M. 2009. Caracterización del valor nutritiva y estabilidad aeróbica de ensilados en forma de microsilos para maíz forrajero. Tesis de maestría. Andalucía, España, Universidad de Córdoba. 66 p.
- Miles, J. W.; Do Valle, C; Rao, I; y Euclides, V. 2004. Brachiaria grasses. En: L.E. Sollenberger, L. Moser and B. Burson (eds.). Warm-season grasses. Madison, E.U. p. 745-783.
- Molina, E; Meléndez, G. 2002. Tabla de interpretación de análisis de suelos. Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. 8 p.
- Muck, R. 1988. Factors influencing silage quality and their implications for management. Journal of Dairy Science 71(11): 2992-3002.
- Muck, RE; O'kiely, P; Wilson, RK. 1991. Buffering capacities in permanent pasture grasses. Irish Journal of Agricultural Research 30:129-141.
- Neumann, M; Frenzel, P; Laerte, J; Restle, J; Ost, P. 2007. Efecto del tamaño de la particular y altura de corta sobre las pérdidas durante el proceso fermentativo en ensilajes de Maíz (*Zea mays* L.). Revista Brasileira de Zootecnia 36(5):1395-1405.
- NRC, 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. Seventh Revised Edition. National Research Council. ISBN. p. 13-17.

- O'kkiely, P; Flinn, V; Poole, D. 1989. Sulphuric acid as silage preservative. Silage preservation, animal performance and copper status. Irish Journal of Agricultural Research 28:1-9.
- Paliwal, RL. 2001. El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción (en línea). FAO, Departamento de Agricultura. Roma. Consultado el 20 de Mayo 2017. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/X7650S/x7650s00.HTML>
- Parker, JW; Crawshaw, R. 1982. Effects of formic acid on silage fermentation, digestibility, intake and performance of young cattle. Grass and Forage Science 37: 53-58.
- Peña, P; Del Pozo, P. 1992. Explotaciones de pastos y forrajes. Tomo II. ISCAH. La Habana, Cuba. 249 p.
- Pezo, D. 1981. Ensilajes de forrajes tropicales. En: Producción y Utilización de Forrajes en el Trópico. Compendio. Turrialba, C.R., CATIE. p. 141-154
- Phiri, M; Ngongoni, N; Maasdorp, B; Titterton, M; Mupangwa, J; Sebata, A. 2007. Ensiling characteristics and feeding value of silage made from browse.
- Playne, M; McDonald, P. 1966. The buffering constituents of herbage and of silage. Journal of the Science of Food and Agriculture 17: 264-268.
- Próspero, F; Martínez, A; Pérez, J.A; Arriaga, C; Vicente, F. 2013. Mejora en la rentabilidad de la producción lechera a partir del uso de ensilado de maíz cultivado con fertilización orgánica. XV Jornadas sobre Producción Animal, Asociación Interprofesional de Desarrollo Agrario, Tomo I, p 28-30. Zaragoza, España.
- Quirós G. 1992. Efecto de niveles crecientes de pseudotallo de banano en combinación con ensilajes de maíz, sobre el crecimiento de terneras Jersey en confinamiento. Tesis de licenciatura. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 75 p.
- Reid, D. 1982. The sward: its composition and management. En: Silage for Milk Production. Technical Bulletin N° 2. Ed.: Irvine, J. A. y Thomas, P. D. National Institute for Research in Dairying, Reading, England. 13-37.UK.

- Rezaei, F; Xing, D; Wagner, R; Regan, JM; Richard, TL; Logan, BE. 2009. Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell. *Appl Environmental Microbiology* 75(11):3673-3678.
- Roa, M; Castillo, C; Téllez, Y E. 2010. Influencia del tiempo de maduración en la calidad de ensilajes con forrajes arbóreos. *Revista Sistemas de Producción Agroecológicos* 1(1): 63-73.
- Ruiz B.O, Y; Castillo, A; Anchondo, C; Rodríguez, R; Beltran, O. J; Payan. 2009. Efecto de enzimas inoculantes sobre la composición del ensilaje de maíz. *Archivos de zootecnia* 58(222):163-171.
- Sánchez, W. 2015. Evaluación de pastos y forrajes para la mejora de la alimentación de las vacas lecheras en la zona alta de Costa Rica. Tesis Doctorado. Zaragoza, España. p. 245.
- Sánchez, W; Bonilla, N; Orozco, E. 2017. Evaluación del potencial forrajero y de ensilabilidad de variedades e híbridos costarricenses de maíz. INTA. Boletín 1. 4 p.
- Sánchez, W; Hidalgo, C. 2018. Potencial forrajero de nueve híbridos de maíz en la zona alta lechera de Costa Rica. *Revista Mesoamericana*. 29(1):153-164.
- Sandoval, C. A. 2004. Ensilaje de Forrajes: Alternativa para alimentación de rumiantes en el trópico. Universidad Autónoma de Yucatán, México. 55 pp.
- SEPSA (Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria). 2015. Boletín Estadístico Agropecuario. Número 24, periodo 2012-2015. San José, Costa Rica. <http://www.infoagro.go.cr/MarcoInstitucional/SEPSA/acercadeSEPSA/Paginas/Direcci%C3%B3nSEPSA.aspx>. Consultada el 25 de julio 2016.
- Shaver, S; Erdman, R; Vandersall, J. 1984. Effects of silage pH on voluntary intake of corn silage. *Journal Dairy Science* 67(9):2045-2049.
- Sibanda, S; Jingura, J; Topps, J; 1997. The effect of level of inclusion of de legume *Desmodium uncinatum* and de use of molasses or ground maize as aditives on the

- chemical composition of grass and maize-legume silages. *Animal Feed Science Technology* 68(1):295-305.
- Siebold, E. 1994. Utilización de ensilajes para producción de carne. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro Regional de Investigación Remehue, Osorno (En Línea). Disponible en: http://www.inia.cl/remehue/publicaciones/online/serie_remehue/52/cap6.pdf
- Smetham, ML. 1990. The conservation of herbage as hay or silage. Pastures their ecology and management. Ed. Langer R.H.M. Oxford University Press. 337-369 pp.
- Soto, P., Jahn, E., y Arredrando, S. 2002. Población y fertilización nitrogenada en un híbrido de maíz para ensilar el Valle Central Regado. *Agrícola Técnica*, 62: 255-265.
- Spoelstra, S.F; Courtin, M.G; Van Beers, JA. 1988. Acetic acid bacteria can initiate aerobic deterioration of maize silage. *Journal of Agricultural Science* 111:127-132.
- Stefanie J.W.H; Driehuis, F; Gottschal, J.C; Spoelstra, S.F. 2001. Los procesos de fermentación del ensilaje y su manipulación. Institute for animal science and health. Lelystad, Holanda. 196 pp.
- Tadeo, M., Espinosa, A., Zaragoza, J., Turrent A., Sierra, M., Gómez, N. 2012. Forraje y grano amarillo para el Valle alto de México. *Agronomía Mesoamericana*, 23: 281-288.
- TropSoils. 1991. Managing Soil Acidity. Groundworks 1. North Carolina State University, Raleigh, NC. 28 pp.
- Uriarte, A. 2004. Ensilado echado a perder: ¿Se puede evitar? (en línea). Consultado en Enero 2017. Disponible en: http://www.oznet.ksu.edu/pr_silage/publications/CIGAL%202004%20-%20Estela%20Uriarte%204-8-08.pdf
- Vallejo, M. 1995. Efecto del premarchitado y la adición de melaza sobre la calidad del ensilaje de diferentes follajes de árboles y arbustos tropicales. Tesis de maestría. CATIE, Turrialba, Cartago, Costa Rica. 117 p.

- Van Soest, P.J. 1975. Forage fibre análisis. Agricultura Handbook N° 379. Agricultural Research Serv. US Dep. Agriculture, USA.
- Van soest, P; Robertson, J; Lewis, A. 1991. Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. Journal of Dietary Science. USA.
- Van Vuuren, A; Huhtanen, P; Dulphy, J. 1995. Improving the feeding and health value of ensiled forage. Proceedings of the Ivth. International Symposium of the Nutrition of Herbivores. Francia, 279-308.
- Villalobos, L. 2010. Evaluación agronómica y nutricional del pasto ryegrass perenne tetraploide producido en lecherías de las zonas altas de costa rica. Revista Agronomía Costarricense 34(1): 43-52.
- Villalobos, L; Arce, J; WingChing, R. 2015. Costos de producción de ensilados de pastos tropicales elaborados en lecherías de Costa Rica. Nutrición Animal Tropical 9(2): 2215-3527.
- Weissbach, F; Honig, H. 1996. Über die Vorhersage und Steuerung des Garungsverlaufs bei der Silierung von Grunfutter aus extensivem Anbau. Landbauforschung Volkenrode 1:10-17.
- Wilkinson, J.M. 1981. Losses in the conservation and utilisation of grass and forage crops. Annals of Applied Biology 98:365-375.
- Wilkinson, J; Toivonen, M. 2003. World silage: A survey of forage conservation around the world. Chalcombe Publications, Lincoln, Reino Unido. 204 p.
- Wingching-Jones R. 2006. Evaluación del proceso de ensilaje de *Arachis pintoí*. Tesis de maestría. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 65 p.
- Wohlt, J. 1989. Use of a silage inoculant to improve feeding stability and intake of a corn silage-grain diet. Journal Dairy Science 72(2):545-551.
- Woolford, M.K. 1984. The Silage Fermentation. Ed.: Marcel Dekker, Inc. New York and Basel. 350 pp.

Zannier, S. 2012. Caracterización del valor nutritivo de los silajes de maíz de la llanura pampeana y la mesopotamia argentinas [en línea]. Trabajo Final de Ingeniería en Producción Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Católica Argentina. Disponible en:
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/caracterizacion-valor-nutritivo-silajes.pdf>