

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA

**EFFECTO DEL NIVEL DE HUMEDAD, TAMAÑO DE PARTÍCULA Y TIEMPO DE
ALMACENAJE SOBRE LA DIGESTIÓN *IN VITRO* DEL ALMIDÓN Y
CARACTERÍSTICAS DE FERMENTACIÓN DE SORGO GRANO (*Sorghum
bicolor L. Moench*) RECONSTITUIDO Y ENSILADO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MÉDICA VETERINARIA ZOOTECNISTA

P R E S E N T A

ERIKA VALERIA HERNÁNDEZ GARCÍA

Asesores:

M.V.Z., M.P.A., Dr. Luis Corona Gochi
M.V.Z., M.P.A. Jesús Manuel Cortéz Sánchez

México, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

*A ti, por enseñarme que cada día es una nueva oportunidad para empezar y brindarme toda la fe necesaria para vivir...
A ti mi Dios infinito.*

A ti mamita por ser todo en mi vida, mi ejemplo a seguir y brindarme la vida, amor, apoyo, confianza, amistad, libertad, educación y economía, para ser lo que hoy soy... Mil gracias mamá, te amo.

A ti papito por darme la vida y enseñarme a luchar sola, sin miedo, porque la libertad y valor en uno mismo, son la llave del éxito, gracias por amarme tanto y apoyarme siempre. Te amo...

*A ti hermana porque siempre has sido mi mejor amiga y confidente. Además de que trajiste al mundo a esas dos lucecitas que iluminaron nuestra vida, y que son grandes razones para vivir y luchar día con día.
Gracias Rodrigo y Leonardo, por ser tan increíbles, tiernos, cariñosos e inteligentes los amo...*

A toda mi familia que con su amor, consejos, y apoyo estoy aquí, los quiero y los amo...

Con todo mi amor: Mamá Chela y Papá Cuco porque siempre me cuidan si yo verlos, pero siempre sintiéndolos.

A tía Evert, por todo tu tiempo, confianza, apoyo y amor. Por ser una extraordinaria persona: "Porque siempre hay que ser derecha como la flecha"

A mamá Tola, porque siempre me has cuidado, apoyado y por ese gran espíritu de fortaleza que nos has inculcado.

A todos, porque ha sido un esfuerzo de años y años...Y sin su apoyo y amor no hubiera terminado: Tío Salvador, tía Vero, Dulce, Juan y Ana. Tía Ángeles, tío Ignacio, Carlos, Marco y Arturo, Tío Antonio.

Amis hermanos César y Oscar, para que un día realicen todo lo que se han propuesto.

A usted Doc. Luis Corona y familia.

A todos los que un día creyeron en mí...

"Cuanto más estés dispuesto a dar, más recibirás a cambio"...P.Cohelo

*En un remoto bar de España, cerca de
una población llamada Olite, hay un
cartel escrito por su dueño:
«Justo cuando conseguí encontrar todas las
respuestas, cambiaron todas las preguntas.»*

Dice el maestro:

*Siempre estamos muy ocupados buscando
respuestas; consideramos respuestas cosas
importantes para comprender el sentido
de la vida.*

*Es más importante vivir plenamente , dejar
que sea el propio tiempo el que se encargue
de revelarnos los secretos de nuestra existencia.*

*Si estamos demasiado ocupados en encontrar
un sentido, no dejamos que la naturaleza actúe,
y somos incapaces de leer las señales de Dios.*

P. Coelho, 2005 Makṭub

AGRADECIMIENTOS

A mi querida Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de llevar sus colores, de formarme desde el nivel bachillerato y de ser lo que hoy soy profesionalmente.

A la Dirección General del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM, a través del proyecto PAPIIT No IN206006 por el apoyo brindado en la realización de este proyecto.

A la mejor, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, así como a todos sus centros de Enseñanza, Investigación y Extensión, por enseñarme cada día que la carrera más hermosa es esta.

A todos mis profesores que dejaron esta semilla que me lleva hoy a ser lo que siempre he deseado, mil gracias por su tiempo, conocimientos, consejos y paciencia.

Al Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la F.M.V.Z. Porque me ha abierto sus puertas y me da la oportunidad de conocer a todo el personal que lo integra, así como aprender de él cada día.

Gracias Dr. Luis Corona Gochi por creer, confiar, enseñarme a trabajar ordenadamente y apoyarme en toda circunstancia. Por ser mi Doc en este camino de la Nutrición y Alimentación animal, ser un guía y un gran amigo, de quién he aprendido y comprendido varias enseñanzas.

Al Dr. Héctor Quiroz Romero por ser mi profesor, tutor y amigo, de quién aprendí a tomar las dos grandes decisiones en mi vida durante mi etapa estudiantil. Y por esos sabios consejos.

Gracias al M.V.Z. Manuel Cortéz por enseñarme y encaminarme a esta rama de la Medicina Veterinaria.

Gracias M.V.Z. Juan Horta por su apoyo en mi trabajo de Cromatografía de Gases y por su increíble amistad.

Mil gracias honorable jurado por su tiempo, consejos, observaciones: Dra. Yolanda Castañeda, Dr. Sergio Ángeles, Dr. Agustín Bobadilla, Dr. Carlos Gutiérrez, Dr. Luis Corona.

Gracias por sus consejos, apoyo, tiempo y amistad: Dr. Humberto Troncoso, Dr. René Rosiles, Dr. Francisco Castrejón, Dr. Manuel Cervantes, Dr. Janitzio, Q.A. Águeda García.

Gracias al Dr. Jaime Navarro quién me aterrizó para poder comprender el diseño estadístico.

Gracias al Dpto. de Microbiología de la FMVZ, especialmente al área de Micología, al Dr. Cervantes y a la Dra. Segundo y todo su equipo de trabajo, para poder realizar el aislamiento e identificación del hongo.

Gracias a todas las personas que han creído en mi y me han acompañado durante alguna etapa en mi vida.
“Porque el valor de las cosas no está en el tiempo que duran, sino en la intensidad con que suceden, por eso existen momentos inolvidables, cosas inexplicables y personas incomparables.”

Gracias a mi familia quiénes siempre con todo su amor y esfuerzo me están apoyando y cuidando:
Papás, hermana y sobrinos,
Tía Evert, tío Salvador, tía Verónica así como a mis primos Dulce, Juan y Anita. A ustedes tía Ángeles, tío Ignacio y primos Carlos, Marco y Arturo. A tío Antonio y Mamá Tola.
A todos en verdad: Familia Hernández Liquidano y Familia García García.

Gracias amigos de toda la vida, quienes me han acompañado a o largo de mi escolaridad, y de mi vida, en todo momento han estado conmigo: Betty, Magda, Raúl, Froylán, Armando (por compartir todo), Alejandro, Carlos, Francisco, Jorge, Heréndira, Javis.

Mis inolvidables Hurrağaz del alma: Janneth, Cinthya, Gabriela, Alejandra, amigas para siempre.

Gracias Kikas por ser únicas e incomparables: (Delia, Kikis, Kikiux, Cristina) por acompañarme en esta aventura de años, ser amigas increíbles así como seres humanos extraordinarios y guiarme cuando más lo necesitaba.

Así como ustedes: Miriam, Sergio, por ser como una familia en Tequisquiapán, Qro y compartir momentos únicos.

Gracias: Nancy, Karina, Constantino, Enrique, Jesús, Aléctor, Alicia (por estar conmigo en esta última etapa), Claudia, Juan José (por confiar en mi, y decirme lee), Álvaro, Alejandra, Grisel y Johanna por apoyarme y alentarme cuando decaía, llegaron en el momento justo, muchas gracias.

Gracias por ayudarme a realizar mi experimento: Miriam, Mariana, Sergio, Carlos, César, Fernando, Ramón, Manuel, Doc. Luis, sin su ayuda no hubiera terminado.

Gracias a ti, por esa increíble magia que provocas en mi, y por existir en este mismo tiempo y espacio.

CONTENIDO

	Página
Lista de cuadros	XI
Lista de figuras	XIV
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Situación mundial del grano de sorgo.....	1
1.1.1 Situación actual del grano de sorgo en México.....	3
1.2 Características del cultivo de sorgo.....	6
1.2.1 Potencial de rendimiento del cultivo del grano de sorgo.....	6
1.2.2 Adaptabilidad del cultivo del grano de sorgo.....	6
1.2.3 Respuesta a la fertilización del cultivo del grano de sorgo.....	7
1.2.4 Relaciones con el agua del cultivo del grano de sorgo.....	7
1.2.5 Temperatura óptima del cultivo del grano de sorgo.....	8
1.3 Composición físico-química del sorgo.....	9
1.3.1 Características nutricionales del grano de sorgo.....	9
1.3.2 Carbohidratos que componen al grano de sorgo.....	11
1.3.3 Proteínas que componen al grano de sorgo.....	12
1.3.4 Lípidos que componen al grano de sorgo.....	13
1.4 Tratamientos utilizados para favorecer la digestibilidad del grano de sorgo en la alimentación animal.....	14
1.4.1 Limitante del grano de sorgo.....	15
1.4.2 Proceso de reconstitución de granos.....	18
1.4.2.1 Procesos que involucran alta humedad.....	20
1.4.2.1.1 Grano remojado.....	20
1.4.2.1.2 Grano de alta humedad.....	20
1.4.2.1.3 Germinación de granos.....	20
1.4.2.1.4 Conservación con ácido de los granos de alta humedad.....	21
1.4.2.1.5 Tratamiento de granos para alimentación de rumiantes.....	21

1.4.3 Proceso de ensilaje.....	23
1.4.3.1 Principios básicos del proceso de ensilaje.....	23
1.5 Digestión del almidón en alimentación de rumiantes.....	28
1.5.1 Utilización del almidón.....	29
1.5.2 Gelatinización del almidón.....	30
1.6 JUTIFICACIÓN.....	33
1.7 HIPÓTESIS.....	33
1.8 OBJETIVOS.....	33
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	34
2.1 Localización.....	34
2.2 Metodología.....	34
2.2.1 Cálculo del nivel de humedad.....	34
2.2.2 Peso de mil granos.....	38
2.2.3 Densidad absoluta.....	38
2.2.4 Proporción de endospermo duro:blando.....	39
2.3 Análisis de laboratorio.....	41
2.3.1 Concentración de pH.....	41
2.3.2 Cuantificación de ácidos grasos volátiles.....	41
2.3.3 Determinación de materia seca	41
2.3.4 Determinación de nitrógeno total.....	41
2.3.5 Determinación de nitrógeno amoniacal.....	41
2.3.6 Determinación de digestibilidad enzimática <i>in vitro</i> del almidón.....	41
2.3.7 Aislamiento e identificación del género micótico.....	42
2.4 Análisis estadístico.....	43
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1 Características físicas del grano de sorgo.....	44
3.1.1 Peso de mil granos	44
3.1.2 Densidad absoluta del grano.....	44
3.1.3 Relación de endospermo duro:blando.....	44

3.2 Características químicas.....	46
3.2.1 Composición química del grano de sorgo.....	46
3.2.2 Porcentaje de humedad.....	48
3.2.3 Concentración de pH.....	51
3.2.4 Porcentaje de ácido acético.....	53
3.2.5 Porcentaje de ácido propiónico.....	55
3.2.6 Porcentaje de ácido butírico.....	57
3.2.7 Porcentaje de ácido láctico.....	59
3.2.8 Relación ácido propiónico:ácido acético.....	61
3.2.9 Relación ácido láctico:ácido acético.....	63
3.2.10 Porcentaje de nitrógeno total.....	66
3.2.11 Porcentaje de nitrógeno amoniacal.....	68
3.2.12 Porcentaje de almidón total.....	71
3.2.13 Porcentaje de almidón soluble.....	73
3.2.14 Porcentaje de almidón insoluble.....	75
3.2.15 Digestibilidad ruminal del almidón <i>in vitro</i>	78
4. CONCLUSIONES.....	82
5. IMPLICACIONES.....	83
6. RECOMENDACIONES.....	84
7. LITERATURA CITADA.....	85
8. ANEXOS.....	97
I. Técnica para determinar ácidos grasos volátiles.....	97
II. Técnica para determinar ácido láctico.....	98
III. Técnica para determinar nitrógeno amoniacal.....	98
IV. Técnica para determinar almidón total.....	99
V. Técnica para determinar almidón soluble	101
VI. Técnica para determinar almidón insoluble	103

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Distribución mundial de la producción de sorgo.....	1
Cuadro 2. Superficie sembrada a nivel mundial.....	2
Cuadro 3. Rendimiento del grano de sorgo a nivel mundial.....	2
Cuadro 4. Principales estados productores de sorgo en México.....	4
Cuadro 5. Consumo y ubicación en el grupo de cultivos.....	4
Cuadro 6. Principales países exportadores de grano de sorgo.....	5
Cuadro 7. Características nutricionales del grano de sorgo.....	9
Cuadro 8. Composición y tipos de kafirinas presentes en grano de sorgo..	12
Cuadro 9. Principales métodos de procesamiento en los cereales.....	15
Cuadro 10. Mejoras en conversión alimenticia con el uso de granos ricos en humedad sujetos a diferentes procesos.....	19
Cuadro 11. Efecto del procesamiento de granos en la productividad de novillos.....	19
Cuadro 12. Efectos del procesamiento de alimentos de maíz y sorgo en la ganancia diaria y la conversión alimenticia.....	22
Cuadro 13. Principales características de fermentación del grano de sorgo reconstituido y ensilado.....	28
Cuadro 14. Gramos de agua necesarios para incrementar los niveles de humedad: 25%, 30%, 35% de un 1 Kg. de grano de sorgo....	35
Cuadro 15. Tratamientos evaluados en el estudio.....	36
Cuadro 16. Resultados de la relación de endospermos duro:blando.....	45
Cuadro 17. Composición química del grano de sorgo utilizado.....	46
Cuadro 18.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en la humedad.....	48
Cuadro 19.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en la concentración de pH.....	51

Cuadro 20.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido acético.....	53
Cuadro 21.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido propiónico.....	55
Cuadro 22.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido butírico.....	57
Cuadro 23.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido láctico.....	59
Cuadro 24.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de la relación ácido propiónico:acético.....	61
Cuadro 25.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de la relación ácido láctico:acético.....	63
Cuadro 26.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de nitrógeno total.....	66
Cuadro 27.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de nitrógeno amoniacal.....	68
Cuadro 28.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón total.....	71
Cuadro 29.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de	

almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón soluble.....	73
Cuadro 30.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón insoluble.....	75
Cuadro 31.Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de digestibilidad ruminal <i>in vitro</i> del almidón.....	78
Cuadro 32. Estudios previos donde se analizaron diferentes cereales, métodos de procesamiento y % de digestibilidad ruminal <i>in vitro</i> e <i>in vivo</i>	79

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Cultivos de sorgo y su alta adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas.....	8
Figura 2. Estructuras que componen al grano de sorgo.....	11
Figura 3. Microscopia electrónica 2000x acercamiento, del endospermo del grano de sorgo.....	13
Figura 4. Cariopsis del grano de sorgo.....	14
Figura 5. Microscopia electrónica 3000x acercamiento, del endospermo vítreo del grano de sorgo.....	16
Figura 6. Microscopia electrónica 3500x acercamiento, del endospermo harinoso del grano de sorgo.....	17
Figura 7. Comparación entre sorgo hojueleado al vapor vs sorgo entero.....	18
Figura 8. Digestibilidad del almidón en diferentes cereales.....	31
Figura 9. Material utilizado para la elaboración de los microsilos.....	37
Figura 10. Compactación de los microsilos.....	37
Figura 11. Modelo del picnómetro de gas.....	38
Figura 12. Granos de sorgos montados en laminillas para la proporción de endospermos.....	40
Figura 13. Fotografía digital del híbrido de sorgo.....	40
Figura14. Fotografía digital, editada en Adobe Photoshop.....	40
Figura 15. Relación de endospermos.....	45
Figura 16. Porcentaje de humedad en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	49
Figura 17. Porcentaje de humedad en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	49
Figura 18. pH en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	51
Figura 19. pH en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	52
Figura 20. Porcentaje de ácido acético en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	53

Figura 21. Porcentaje de ácido acético en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	54
Figura 22. Porcentaje de ácido propiónico en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	55
Figura 23. Porcentaje de ácido propiónico en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	56
Figura 24. Porcentaje de ácido butírico en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	58
Figura 25. Porcentaje de ácido butírico en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	58
Figura 26. Porcentaje de ácido láctico en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	60
Figura 27. Porcentaje de ácido láctico en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	60
Figura 28. Porcentaje en la relación ácido propiónico:acético en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	62
Figura 29. Porcentaje en la relación ácido propiónico:acético en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	62
Figura 30. Porcentaje en la relación ácido láctico:acético en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	64
Figura 31. Porcentaje en la relación ácido láctico:acético en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	64
Figura 32. Porcentaje de nitrógeno total en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	66
Figura 33. Porcentaje de nitrógeno total en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	67
Figura 34. Porcentaje de nitrógeno amoniacal en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	68
Figura 35. Porcentaje de nitrógeno amoniacal en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	69

Figura 36. Porcentaje de almidón total en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	71
Figura 37. Porcentaje de almidón total en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	72
Figura 38. Porcentaje de almidón soluble en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	74
Figura 39. Porcentaje de almidón soluble en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	74
Figura 40. Porcentaje de almidón insoluble en el grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.....	76
Figura 41. Porcentaje de almidón insoluble en el grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.....	76
Figura 42. Porcentaje de digestibilidad ruminal <i>in vitro</i> del almidón en grano de sorgo entero, reconstituido y ensilado.....	80
Figura 43. Porcentaje de digestibilidad ruminal <i>in vitro</i> del almidón en grano de sorgo quebrado, reconstituido y ensilado.....	81

RESUMEN

HERNANDEZ GARCIA ERIKA VALERIA. Efecto del nivel de humedad, tamaño de partícula y tiempo de almacenaje sobre la digestión *in vitro* del almidón y características de fermentación de sorgo grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) reconstituido y ensilado. (Bajo la dirección de: M.V.Z, M.P.A, Dr. Luis Corona Gochi y M.V.Z, M.P.A. Jesús Manuel Cortéz Sánchez)

Los métodos más utilizados en México para procesar el grano de sorgo en la alimentación de rumiantes son el molido y quebrado, sin embargo estos métodos no son suficientes para desdoblar la matriz proteica que envuelve los gránulos de almidón y optimizar su utilización. El proceso de hojueleado al vapor consistentemente mejora la digestibilidad total del almidón y el valor alimenticio del sorgo y del maíz pero es costoso y presenta variabilidad en el proceso del sorgo por el tamaño del grano. El proceso de reconstitución y ensilaje puede ser una alternativa de tratamiento, pero no existe suficiente información acerca de las características óptimas para dicho proceso. Por lo que los objetivos del presente estudio fueron determinar el efecto del tamaño de partícula (entero y quebrado), porcentaje de humedad (25, 30 y 35%), y tiempo de ensilaje (0, 21 y 42d) en la digestibilidad *in vitro* del almidón (**DIVA**) y las características de fermentación del grano de sorgo reconstituido y ensilado: (**pH**), ácido acético (**AA**), ácido propiónico (**AP**), ácido butírico (**AB**), ácido láctico (**AL**), nitrógeno amoniacal (**N-NH₃**) y nitrógeno total (**NT**). Se elaboraron 72 microsilos cada uno representó la unidad experimental y se asignaron a un diseño completamente al azar, con arreglo factorial 2x3x3. El pH disminuyó (29.6 y 32.05%, $P < 0.01$) para 21 y 42d respecto a 0d. Para AC, al aumentar el % de humedad se incrementó (29.32 y 66.15%, $P < 0.0287$) para 30 y 35% respecto a 25% de humedad. Sin embargo es mayor (26.88%, $P < 0.0287$) para 42 respecto a 21d. En AP al incrementar el tiempo de almacenaje, aumentó (27.2%, $P < 0.0002$) para 42 respecto a 21d. En AB al incrementarse el nivel de humedad se incrementó (29.6 y 61.2%, $P < 0.0016$) para 30 y 35% respecto a 25% de humedad. Sin embargo son mayores (3.63%, $P < 0.0378$) los valores de 21d respecto a 42d. Y son mayores (61.20%, $P < 0.0007$),

en grano quebrado con 30% de humedad, respecto a entero. AL se incrementó (165 y 153% en grano entero, 178 y 189% para quebrado, $P < 0.001$) a 21 y 42d respectivamente. En N-NH₃ para grano entero (71.09 y 83.95%, $P < 0.0001$) y quebrado se incrementó (75.61 y 82.93%, $P < 0.0001$) para 21 y 42d respecto a 0d. En DIVA se observó una interacción ($P < 0.01$) entre tamaño de partícula y tiempo de almacenaje. Para el día 0, el promedio de digestibilidad fue de 63.43 y 60.98%; para 21d se incrementó 1.55 y 10.6%; al d42 se incrementó 5.80 y 8.95% respecto al d0 para entero y quebrado respectivamente. Considerando la digestibilidad del almidón y características de fermentación, las mejores condiciones para realizar el proceso de reconstitución y ensilaje fue utilizar grano de sorgo quebrado con 30% de humedad y ensilarlo por 21 días. Para ensilar grano entero se debe permitir un tiempo de ensilaje de 42d para obtener digestibilidades similares a las encontradas con grano quebrado.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación mundial del sorgo

El grano de sorgo se emplea con dos distintas finalidades: alimentación humana y elaboración de alimentos balanceados para consumo animal.¹

A nivel mundial, a principios de 1970's una gran parte de la producción de sorgo se empleaba directamente en la alimentación humana, actualmente ha disminuido la proporción que se destina para este fin. Duplicándose, la utilización del grano de sorgo para consumo animal. En América y Oceanía, la mayor parte del grano de sorgo producido se emplea para consumo animal; mientras que en África una parte importante se destina para consumo humano. Los Estados Unidos, México y Japón son los principales países consumidores de sorgo, seguidos por Argentina, los países que fueron de la Unión Soviética (Rusia, Letonia, Lituania) y Venezuela. Estos países absorben conjuntamente más del 80 por ciento de la producción mundial de sorgo para consumo animal.² En los Cuadros 1, 2 y 3 se pueden observar estadísticas relevantes acerca de la distribución en la producción, superficie sembrada y rendimiento del grano de sorgo a nivel mundial.^{1,2}

Cuadro 1. Distribución mundial de la producción del grano de sorgo. Año agrícola 2002

País	Superficie cultivada (Has)	%	Rendimiento (Ton/ha)	Producción (Ton)	%
Estados Unidos	3,046,510	7.24	3.18	9,690,520	17.51
India	9,900,000	23.51	0.81	8,000,000	14.46
México	1,850,000	4.39	2.97	5,500,000	9.94
China	754,489	1.79	3.62	2,731,652	4.94
Nigeria	7,280,000	17.29	1.13	8,194,000	14.81
Argentina	573,000	1.36	4.69	2,691,000	4.86
Sudán	4,000,000	9.50	0.78	3,100,000	5.60
Etiopía	1,181,143	2.81	1.30	1,538,281	2.78
Australia	773,000	1.84	2.30	1,777,000	3.21
Otros países	11,295,209	26.83	1.31	10,768,372	19.46
T o t a l	42,103,351	100.00	2.09	55,340,825	100.00

Cuadro 2. Superficie sembrada a nivel mundial (Has) 1980-2002

País	1980	1985	1990	1995	2000	2002
Estados Unidos	5,057,010	6,791,500	3,678,000	3,340,000	3,126,630	3,046,510
India	15,804,545	16,097,000	14,358,000	11,326,000	9,991,400	9,900,000
México	1,542,581	1,862,140	1,817,741	1,372,350	1,899,201	1,850,000
China	2,692,085	1,965,005	1,570,622	1,237,964	894,956	754,489
Nigeria	3,294,643	4,862,000	4,185,000	6,095,000	6,885,000	7,280,000
Argentina	1,281,385	1,965,000	729,135	476,890	723,600	573,000
Sudán	2,935,211	5,526,152	2,759,400	5,045,000	4,195,000	4,000,000
Etiopía	1,026,988	1,076,730	1,287,900	919,830	995,410	1,181,143
Australia	517,999	723,000	380,034	686,246	818,000	773,000
Otros países	8,917,486	9,976,429	10,827,340	10,650,281	10,184,612	11,295,209
T o t a l	44,029,373	50,844,956	41,593,172	42,595,256	40,939,032	42,103,351

Cuadro 3. Rendimiento del grano de sorgo a nivel mundial (Ton/ha). 1980-2002

País	1980	1985	1990	1995	2000	2002
Estados Unidos	2.91	4.19	3.96	3.49	3.82	3.18
India	0.66	0.63	0.81	0.82	0.77	0.81
México	3.04	3.54	3.29	3.04	3.08	2.97
China	2.52	2.90	3.68	3.92	2.91	3.62
Nigeria	1.12	1.01	1.00	1.15	1.12	1.13
Argentina	2.31	3.16	2.81	3.46	4.63	4.69
Sudán	0.71	0.65	0.43	0.49	0.59	0.78
Etiopía	1.60	0.75	0.58	1.25	1.34	1.30
Australia	1.78	1.89	2.49	1.85	3.40	2.30
Promedio mundial	1.30	1.53	1.36	1.28	1.38	1.31

1.1.1. Situación actual del grano de sorgo en México

En México el grano de sorgo es utilizado en la elaboración de alimentos balanceados para consumo animal, principalmente en aves, cerdos y en menor proporción para rumiantes. La introducción del cultivo en el país es relativamente reciente, para el año de 1961 se cosecharon 116,993 hectáreas, cinco años más tarde la superficie cosechada se incrementó 69%, de tal manera que para 1999 ya se cosechaban alrededor de 2 millones de hectáreas. ¹

México es uno de los países con mayor producción de sorgo en el mundo, ocupa el quinto lugar en superficie cultivada con 1.8 millones de hectáreas y el cuarto lugar en producción con 5.5 millones de toneladas. El rendimiento promedio del sorgo en México es de 2.97 ton/ha y es superior al promedio mundial, que es de 2.09 ton/ha. ^{1,2,3}

En el sector agrícola para uso pecuario, el sorgo representa el 68% del cultivo nacional, después el maíz con 27%, otros con 5% (trigo, avena, cebada, centeno y arroz). ^{1,2,3}

Como se observa en el Cuadro 4 los principales estados productores de sorgo en México son: Tamaulipas que ocupa el primer lugar con 2.1 millones de toneladas; Guanajuato el segundo lugar con 1.61 millones de toneladas; el tercer lugar lo ocupa Michoacán con 0.85 millones de toneladas; y el cuarto lugar Sinaloa con 0.48 millones de toneladas, que representan el 32.4%, 24.6% , 13.0% y 7.4% de la producción total; estos cuatro estados producen el 77.4% del volumen de la producción. ^{4,5,6,7}

Se consideran dos épocas de cosecha del grano de sorgo, primavera-verano (en los meses de Junio, Julio y Agosto); e invierno (en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre), en las regiones del bajo y norte del país. ^{2,3}

Cuadro 4. Principales estados productores del grano de sorgo. Año Agrícola 2001

Estado	Sup. Semb. (has)	%	Sup. Cos. (has)	%	Rend. (ton/ha)	Prod. (ton)	%	Valor de la prod. (miles de \$)	%
Tamaulipas	1,148,841	51.9	974,952	50.2	2.18	2,127,417	32.4	1,785,784	27.4
Guanajuato	242,282	10.9	242,274	12.5	6.67	1,615,337	24.6	1,703,146	26.2
Michoacán	154,606	7.0	142,739	7.3	5.97	852,677	13.0	907,408	13.9
Sinaloa	267,990	12.1	205,843	10.6	2.35	482,676	7.4	482,652	7.4
Jalisco	91,713	4.1	90,518	4.7	5.18	468,622	7.1	507,469	7.8
Nayarit	59,741	2.7	56,426	2.9	4.50	253,835	3.9	275,428	4.2
Otros	247,604	11.2	230,031	11.8	3.33	765,971	11.7	845,459	13.0
T o t a l	2,212,777	100.0	1,942,783	100.0	3.38	6,566,535	100.0	6,507,346	100.0

Dentro de los granos básicos el maíz es el más consumido en México, en el 2002 el consumo nacional aparente de éste fue de 25.56 millones de toneladas y el consumo *per cápita* de 238.40 kilogramos. El segundo lugar lo ocupa el sorgo con un consumo nacional aparente de 9.91 millones de toneladas y un consumo *per cápita* de 99.1 kilogramos, como se observa en el Cuadro 5.^{1,8,9}

Cuadro 5. Consumo y ubicación del grano de sorgo vs otros cultivos. Año agrícola 2002.

Concepto	Consumo nacional aparente (miles de toneladas)	Consumo per cápita (Kilogramos)
Granos básicos		
Arroz	921.70	8.90
Maíz	24, 564.10	238.40
Trigo	5, 691.20	55.20
Sorgo	9, 919.50	99.10
Cebada	936.40	9.10
Oleaginosas		
Ajonjolí	24.10	0.20
Algodón	337.0	3.30
Soya	4, 465.30	43.30
Cártamo	54.00	0.50

La necesidad de consumo del grano de sorgo en México ha aumentado drásticamente, como lo ejemplifica el Cuadro 6, en 1980 se importaron 2.25 millones de toneladas y en el 2002 la cantidad de 5.03 millones de toneladas, éste representó un incremento del 123.26%. El sorgo que se importa proviene generalmente de Estados Unidos y Argentina. A partir de la entrada en vigor del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) las importaciones de sorgo aumentaron aún más que desde 1980, de 1995 al 2002 incrementaron en 140.5%, pasando de 2.09 a 5.03 millones de toneladas, Estados Unidos pasó de 1.45 a 4.07 millones de toneladas, representando un crecimiento de 179.9% y Argentina creció 62.8% pasando de 0.52 a 0.86 millones de toneladas.^{1,8,9}

Cuadro 6. Principales países exportadores de grano de sorgo en las últimas décadas (miles de toneladas)

País/Año	1980	1985	1990	1995	2000	2002
Estados unidos	1,725.8	1,891.5	2,769.6	1,455.5	4,370.7	4,075.2
Argentina	481.3	299.1	---	527.5	772.0	858.9
Otros	46.8	64.2	---	---	---	98.0
Total	2,253.9	2,254.8	2,860.8	2,092.5	5,142.0	5,032.1

Como es de esperarse, México tiene una considerable pérdida de divisas debido a las importaciones de sorgo, en 1980 el valor de las importaciones fue de 312.7 millones de dólares y en el 2002 de 553.5 millones de dólares, que representa un crecimiento del 77.01%. El sorgo para grano es un producto que quedó comprendido en la categoría D (libre de arancel) y A (desgravación inmediata), a pesar que se haya fijado una tasa base del 15% para las importaciones realizadas dentro del período comprendido entre el 16 de mayo y el 15 de diciembre 1993. Es decir, se encuentra en libre comercio prácticamente desde el primero de enero de 1994. El consumo de sorgo en el último año es superior en 88% al volumen de la producción nacional, lo que explica el crecimiento de las importaciones; así mismo, por cada 100 toneladas de sorgo que se consume en México el 46.7% es de importación, esto refleja la insuficiencia de la producción para satisfacer la demanda nacional.^{1,8,9}

Debido al precio actual del maíz amarillo americano y baja disponibilidad, por su utilización en la producción de biogas, se espera una mayor demanda de grano de sorgo.^{8,9}

1.2. Características del cultivo del grano de sorgo

1.2.1. Potencial de rendimiento del cultivo del grano de sorgo

El sorgo tiene un potencial de rendimiento elevado, comparable al del arroz, trigo o maíz. En condiciones de campo los rendimientos pueden llegar a superar las 11 ton/ha; con rendimientos promedio aceptables que fluctúan entre 7 y 9 ton/ha, cuando la humedad ambiental no es un factor limitante.¹⁰

En las zonas áridas al norte del país, donde el sorgo es un cultivo común se obtienen rendimientos de 3 a 4, ton/ha bajo adecuadas condiciones ambientales, y bajan a 0.3 o 1 ton/ha cuando la humedad ambiental se vuelve limitante.¹⁰

1.2.2. Adaptabilidad del cultivo del grano de sorgo

El cultivo del grano de sorgo se adapta a climas muy variados y necesita de 90 a 140 días para madurar. Los rendimientos más altos se obtienen normalmente de variedades que maduran entre 100 y 120 días. Los sorgos para grano tienen una relación de grano a paja de 1:1. Las variedades que maduran más temprano pueden no rendir lo mismo a causa de que su período de crecimiento es más corto; en contraposición con las variedades tardías que tienden a producir mayor cantidad de forraje y menos grano (relación 5:1).¹⁰

Los mejores rendimientos de variedades tardías de ese tipo, normalmente promedian entre 1.5 a 2, ton/ha, comparados con 4 a 5 ton/ha o más de los tipos demasiado precoces.¹⁰

Además se han creado nuevas líneas (A, B y R) de sorgo grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) tolerantes al frío (TF) y adaptadas a regiones con altitudes de 2200 msnm, y se han combinado con líneas susceptibles al frío (SF) adaptadas a

ambientes tropicales y subtropicales de México. Desde 1994 se han evaluado y clasificado los diversos tipos de híbridos. Así, se ha propuesto incrementar los rendimientos unitarios, mediante híbridos con alto potencial de rendimiento, adaptados a áreas agroecológicas más amplias, con mayor precocidad y tolerantes al frío y a la sequía.^{11,12,13,14}

Con dichos estudios se ha establecido que la incorporación de progenitores tolerantes al frío es una buena alternativa para incrementar el rendimiento de grano de los híbridos para condiciones de riego en las áreas sorgeras tradicionales de México.^{11,12,13,14}

1.2.3. Respuesta a la fertilización del cultivo del grano de sorgo

La respuesta a la fertilización es diferente entre las variedades de sorgo, algunas desarrolladas en condiciones de baja fertilidad y sequía producen de 6 a 10 kg de grano por kilogramo de nitrógeno aplicado, mientras que las variedades que responden a altos niveles de fertilidad producen de 20 a 40 kg de grano por kilogramo de nitrógeno aplicado.¹⁰

1.2.4. Relaciones con el agua del cultivo del grano de sorgo

El sorgo se cultiva generalmente bajo condiciones de climas secos y calientes. El sorgo tiene un sistema radicular más fibroso y ramificado. Las raíces de la planta penetran un mayor volumen de suelo para obtener la humedad. El fertilizante, aún bajo condiciones de baja precipitación, estimula el desarrollo de las raíces; de aquí que las raíces tienen la habilidad de extraer humedad de un mayor volumen de suelo. La mayor humedad así disponible a la planta, junto con la mejor fertilidad, estimulan rendimientos más altos. También es importante señalar que el sorgo requiere menos humedad para su crecimiento que algunos otros cereales, algunos estudios demuestran que el sorgo requiere 332 kg de agua por kg de materia seca acumulada, en tanto que el maíz requiere 368 kg de agua, la cebada 434 kg y el trigo 514 kg. Además, el sorgo tiende a detener su crecimiento durante el período seco, y lo reanuda con el regreso de la lluvia.^{10,11,14}

Con respecto a la necesidad de agua del sorgo, ésta aumenta conforme la planta crece, alcanzando su mayor necesidad durante el período de la floración; después de esta época el consumo del agua decrece.^{10,11,14}

El cultivo del grano de sorgo es capaz de soportar excesos de humedad mejor que muchos otros cereales (especialmente el maíz). El sorgo continúa creciendo en condiciones de inundación, así como también es tolerante a las sales y a la toxicidad por aluminio.^{10,11,14}

1.2.5. Temperatura óptima del cultivo del grano de sorgo

El sorgo produce grano aún bajo temperaturas altas. El cruzamiento en el cultivo puede ser difícil bajo temperaturas de 40°C o superiores, con humedades relativas a un 30% o menos. El desarrollo floral y la formación de semilla son normales, (Ver figura 1), si hay humedad disponible en el suelo a temperaturas de 40 a 43 °C y 30 a 40 % de humedad relativa.^{10,11,14}

Cabe señalar que el sorgo no es un cultivo demasiado tolerante al clima frío, como el maíz. Por el contrario, el sorgo crece lentamente a temperaturas de 20 °C; aunque se ha dado el caso de algunas variedades que pueden germinar y crecer a temperaturas tan bajas como 12 °C.^{10,11,14}

Figura 1. Cultivos de sorgo y su alta adaptabilidad a diferentes condiciones climáticas



1.3. Composición físico-química del grano de sorgo

1.3.1. Características nutricionales del grano de sorgo

Tradicionalmente, el sorgo, es considerado de menor calidad nutricional al compararlo con el maíz debido a su composición química variable, a la presencia del endospermo periférico o duro más desarrollado, y a la existencia de mayor cantidad de cuerpos proteicos presentes en el grano de sorgo que limitan su degradación bacteriana con respecto al maíz.^{13, 14}

La variabilidad en la composición química y calidad nutritiva del grano de sorgo puede ser atribuida en parte a las diversas condiciones ambientales a las que puede ser sometido durante su crecimiento y maduración. Por otra parte, el valor alimenticio del sorgo puede estar determinado por la presencia de taninos, pero sobre todo por el genotipo, ya que determina la naturaleza de la textura, el tipo de endospermo y la composición química.^{13, 14, 15,16}

El costo del sorgo en grano es comúnmente, en muchas áreas, del 10 al 15% inferior al del maíz. Además de los incentivos económicos y medioambientalistas, los científicos están mejorando su valor nutritivo y mejorando su proceso, lo que resultará en un mejor valor nutricional. Con estos avances, la producción de sorgo tiene un futuro brillante como fuente energética.^{13,14.} Como se muestra en el Cuadro 7 el valor nutricional del grano de sorgo nos indica que es una fuente energética ideal para la industria pecuaria en el país.¹⁵

Cuadro 7. Valores nutricionales del grano de sorgo.
Valores tomados del Feedstuffs¹⁵

Nutriente	Concentración total	Disponible %
Materia seca (%)	89	---
Proteína cruda (%)	11	---
Extracto etéreo (%)	2.8	---
Fibra cruda (%)	2.0	---
Cenizas (%)	1.7	---

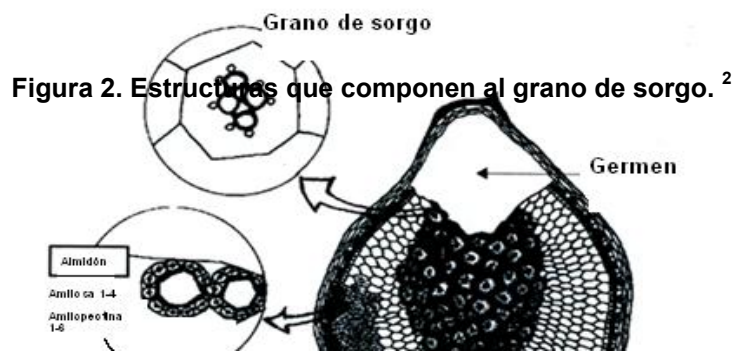
Continuación del cuadro 7. Valores nutricionales del grano de sorgo ¹⁵

Calcio (%)	0.04	---
Fósforo total (%)	0.29	0.10
Metionina (%)	0.10	89
Cistina (%)	0.20	83
Lisina (%)	0.27	78
Triptofano (%)	0.09	---
Treonina (%)	0.27	82
Isoleucina (%)	0.60	88
Histidina (%)	0.27	87
Valina (%)	0.53	87
Leucina (%)	1.40	94
Arginina (%)	0.40	74
Fenilalanina (%)	0.45	91
Vitamina E (mg/kg)	12.2	---
Tiamina (mg/kg)	3.90	---
Riboflavina (mg/kg)	1.20	---
Ácido pantoténico (mg/kg)	11.0	---
Biotina (mg/kg)	180	---
Ácido fólico (mg/kg)	200	---
Colina (mg/kg)	678	---
Niacina (mg/kg)	42.7	---
Sodio (ppm)	0.03	---
Potasio (ppm)	0.34	---
Cloro (ppm)	0.09	---
Magnesio (ppm)	0.20	---
Azufre (ppm)	0.09	---
Hierro (ppm)	52.0	---
Cobre (ppm)	14.1	---
Zinc (ppm)	13.7	---

1.3.2. Carbohidratos que componen al grano de sorgo

Carbohidratos solubles: El almidón ocupa del 32 al 79% del peso del grano; desde el punto de vista cuantitativo, es el carbohidrato complejo soluble más importante, se presenta en dos configuraciones moleculares principales de polímeros de glucosa, la amilosa (α 1-4) y la amilopectina (α 1-6). Como se muestra en la Figura 2, podemos identificar los componentes del endospermo (almidón) del grano de sorgo. La amilosa es un polímero lineal de glucosa (con un peso molecular de 150 000 a 1 millón de dalton). La amilopectina es un polímero lineal con numerosas ramificaciones (peso molecular de 10 a 100 millones de dalton). La proporción entre amilosa y amilopectina es aproximadamente de 25:75.^{17,18,19}

Carbohidratos insolubles: Los mayores componentes de fibra en el grano de sorgo son: celulosa, hemicelulosa, lignina, y pectina que son localizados principalmente en el pericarpio y pared del endospermo. El grano de sorgo contiene 6.5 a 7.9% fibra insoluble y 1.1 a 1.23% por el grano la fibra soluble, la mayoría de la fibra en el sorgo es insoluble, aproximadamente 86.2% y se localiza en el pericarpio, proporcionando funciones de protección y estructura.^{17,18}



1.3.3. Proteínas que componen al grano de sorgo

De todos los nutrientes del grano de sorgo, la proteína es la más variable; puede contener de 7 a 15% de proteína cruda.^{18,20}

El 80% de la proteína del grano se localiza en el endospermo y está compuesta por glutelinas (solubles en detergente + agentes reductores + pH alcalino) y prolaminas (kafirinas cruzadas (solubles en alcohol agentes reductores). El 20% de proteína restante, se localiza en el germen y está formada por albúminas (solubles en agua) y globulinas (solubles en sal).²⁰ Las kafirinas comprenden el 50-70% del total de las proteínas del sorgo²¹ y la proporción de glutelinas-kafirinas en el grano es de 1:25.²² Se conoce que las α -kafirinas son las más digestibles con respecto a las β y γ -kafirinas, esto por el gran número de enlaces intermoleculares durante el desarrollo y su localización.^{21,22}

En el Cuadro 8 se pueden observar los diferentes tipos de kafirinas que componen al grano de sorgo.²³

Cuadro 8. Composición y tipos de kafirinas presentes en el grano de sorgo²³

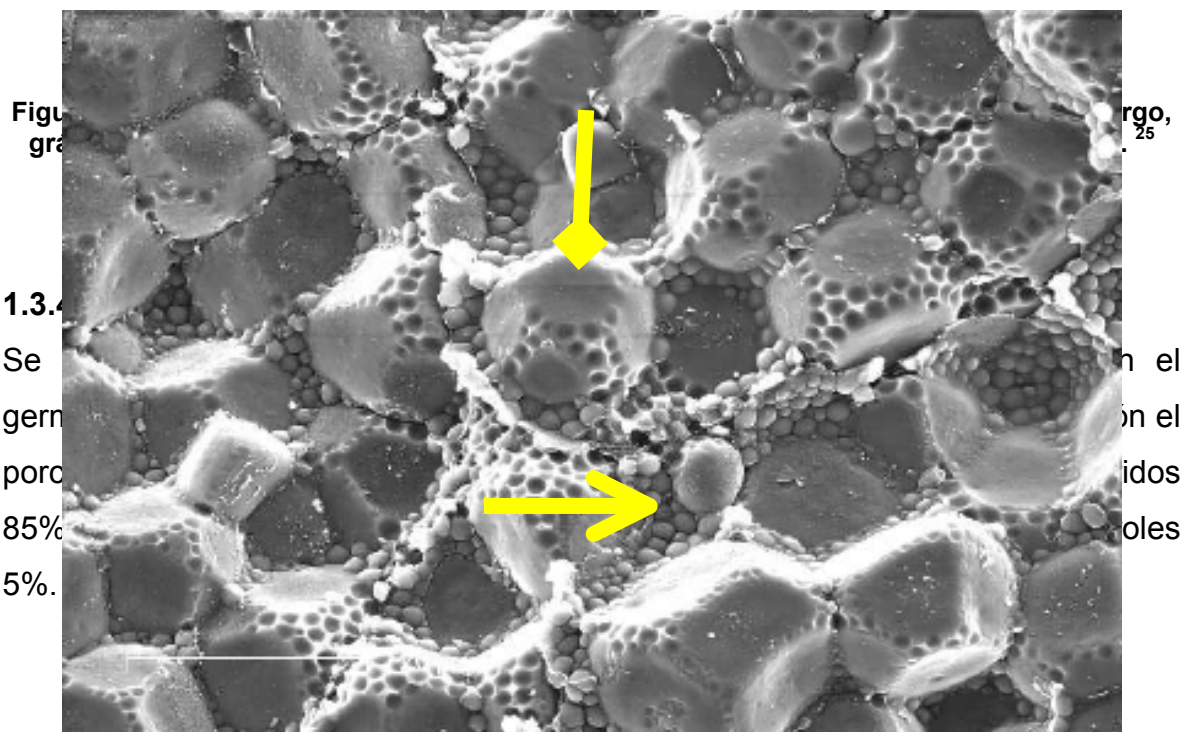
Tipos kafirina	Masa molecular	Aminoácidos residuales	Composición aminoácidos	Comportamiento polimerización
α	26,000–27,000	240–250	Ricas en aminoácidos no-polares, sin Lis, 1 Trp, 10 repeticiones	Monómeros, oligómeros y polímeros
β	18,745	172	Ricas en Met, Cis, 2 Trp	Monómeros y polímeros
γ	20,278	193	Ricas en Pro, Cis, His, Asp, Trp, sin Lis, Asn. 4 repeticiones	Oligómeros y polímeros
δ	12,961	114	Ricas en Met, sin Lis, 1 Trp	Desconocido

Lis : Lisina, Trp : Triptofano, Met : Metionina, Cis : Cisteína, Pro : Prolamina, His : Histidina, Asp : Aspartato, Asn: Asparagina.

Está documentado que el grano de sorgo debe someterse a un proceso más vigoroso que el maíz, puesto que la digestibilidad ruminal de la proteína del sorgo es consistentemente menor que la del maíz, trigo y cebada. Estas observaciones indican la importancia de la digestibilidad de la proteína, en el valor alimenticio del

grano de sorgo, así el desdoblamiento de la matriz proteica es esencial para optimizar la digestión de los gránulos de almidón (Ver figura 3).²⁴

El proceso de reconstitución causa una degradación fermentativa de la matriz proteica, tanto en grano cosechado temprano u utilizado antes de que la matriz proteica sea completamente formada y solidificada como en grano maduro reconstituido y ensilado.²⁵



1.4. Tratamientos utilizados para favorecer la digestibilidad del grano de sorgo en la alimentación animal

El almidón y la proteína constituyen los nutrientes básicos de las materias primas utilizadas en la producción intensiva de rumiantes, cuyos ingredientes mayoritarios son los cereales y concentrados proteicos de origen vegetal o animal. Tanto los granos de cereales como los concentrados proteicos son, generalmente, sometidos a diversos tipos de tratamientos durante el proceso de elaboración de alimento. La Figura 4 nos muestra las principales estructuras del grano de sorgo.²⁶ En ocasiones, el tratamiento forma parte obligada del proceso de obtención de la materia prima, como ocurre con los granos de cereales y harinas de semillas oleaginosas, o bien es necesario para la conservación y esterilización de productos perecederos, como en el caso de las harinas de carne o pescado. Independientemente del fin perseguido, la mayor parte de los tratamientos alteran, en mayor o menor grado, la calidad nutritiva de las materias primas.²⁶



En el Cuadro 9 se muestran los principales métodos de procesamiento de los cereales, los cuales varían en función de temperatura y humedad, aunque generalmente, en la práctica, se utilizan combinaciones de varios métodos.

Cuadro 9. Principales métodos de procesamiento en los cereales

<i>TRATAMIENTO</i>	<i>FRÍO Y SECO</i>	<i>FRÍO Y HÚMEDO</i>	<i>CALIENTE Y SECO</i>	<i>CALIENTE Y HÚMEDO</i>
Molido	♥			
Quebrado	♥			
Rolado en seco	♥			
Reconstituido		♥		
Rolado al vapor				♥
Hojuelado al vapor				♥
Peletizado				♥
Extrudizado				♥
Reventado			♥	
Micronizado			♥	
Tostado			♥	
Ensilaje				♥

1.4.1. Limitante del grano de sorgo

El grano de sorgo presenta una limitante importante que tiene que ver con su estructura física y química. La cual involucra al endospermo del grano, el endospermo vítreo (duro) y el endospermo harinoso (blando), los cuales son ricos en gránulos de almidón pero están cubiertos de una matriz proteica muy densa, sobretodo en el endospermo vítreo, la cual es difícil de digerir en el sorgo y el maíz.²⁴

El sorgo difiere del maíz en que contiene una alta proporción de cuerpos proteicos (kafirinas cruzadas). El desdoblamiento de la matriz proteica es esencial para optimizar la digestión del almidón. La factibilidad para desdoblar la matriz proteica variará con la cantidad de proteína asociada con los gránulos de almidón. Algunos

gránulos de almidón están rodeados de una espesa matriz proteica. Esto comprende al endospermo córneo o vítreo, así llamado por su naturaleza dura. La Figura 5, analizada por Hamaker, *et al.* ²⁰ nos muestra una microscopia electrónica del endospermo duro del grano de sorgo. En contraste, la mayoría del endospermo harinoso tiene gránulos de almidón rodeados por una delgada matriz proteica. Los gránulos de almidón dentro del endospermo harinoso, son más abiertos o poco condensados, dando una apariencia opaca harinosa, tal como lo muestra la Figura 6. ^{20,24,25}



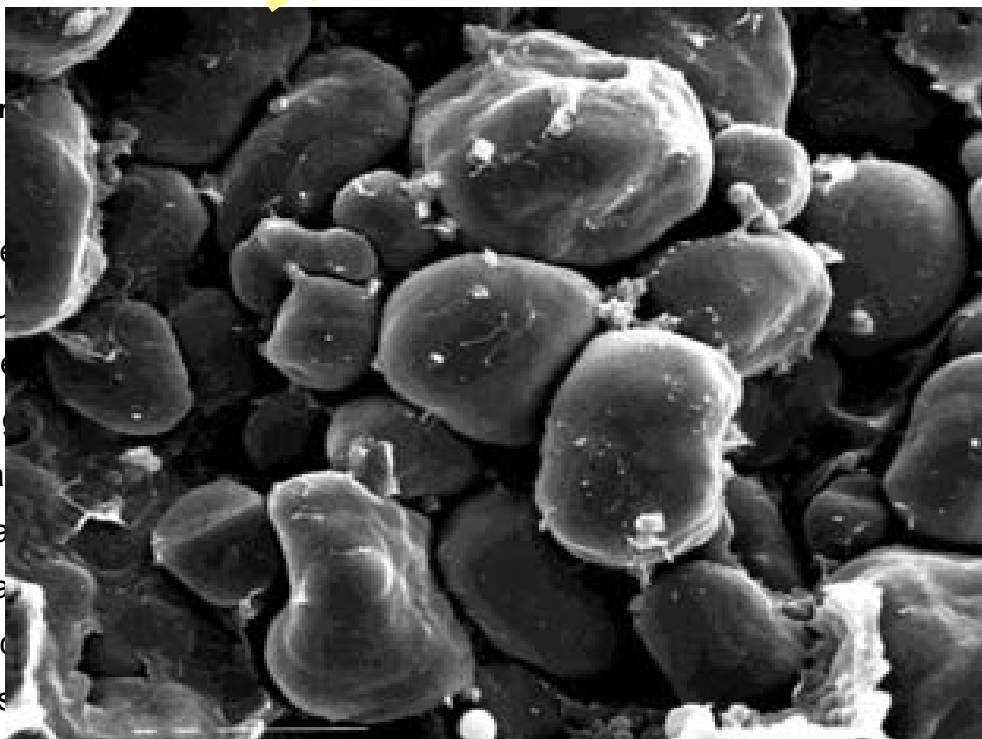
Figura 5. Microscopia electrónica 3000x acercamiento, de la porción vítrea de endospermo del sorgo. Los cuerpos de proteicos (kafirinas) son indicadas por la flecha. Hamaker, *et al.* ²⁰

Figura

echa

Los me
para ru
para de
en el c
alguna
técnica
técnica
de proc
Aún as

e sorgo
cientes
tenido
nte de
erentes
entre la
grado
d total



del almidón y el valor alimenticio del sorgo y del maíz cuando se compara contra el grano entero, el quebrado en seco o molido. Figura 7. Sin embargo, el hojueleado al vapor en el caso particular del sorgo, existe una alta variación en los resultados debido principalmente a que la calidad de la hojuela no es homogénea por la variación que existe normalmente en el tamaño del grano.^{27,28, 29,30,31}

Figura 7. C



rgo entero

Otro proceso

maíz y sorgo

digestibilidad

29,30,31

realizados con

mento en la

ado al vapor.

1.4.2. Proce

La reconstitución es una alternativa para incrementar el valor nutricional del grano de sorgo seco. Consiste en la adición de agua al grano maduro y seco para aumentar el contenido de humedad de 25 hasta un 35% y el posterior almacenamiento del grano húmedo en un silo ausente de oxígeno durante 21 días, ya que en el silo debe buscarse anaerobiosis para evitar pérdidas por fermentación. ^{32,33,34,35}

El proceso produce una degradación fermentativa de la matriz proteica, tanto en grano cosechado temprano o utilizado antes de que la matriz proteica sea completamente formada y solidificada como en grano maduro reconstituido. ^{32,33,34,35}

Cuando se alimenta al ganado con granos ricos en humedad, previamente ensilados, debe buscarse que el consumo sea lo más inmediato posible, ya que al

exponerse al aire, la fermentación aeróbica se inicia de inmediato; también debe ponerse atención para prevenir el crecimiento de hongos.³⁵

El almacenamiento del grano húmedo se realiza con el grano entero, en donde es necesario su posterior procesamiento para proceder a la alimentación de los animales. En el Cuadro 10 se resumen los resultados de 29 experimentos involucrando diferentes formas de almacenamiento del grano húmedo asociadas con molido o rolado.³⁵

Cuadro 10. Mejoras en conversión alimenticia con el uso de granos ricos en humedad sujetos a diferentes procesos

GRANO	% HUMEDAD	TAMAÑO DE PARTÍCULA	% DE INCREMENTO EN CONVERSIÓN ALIMENTICIA SOBRE EL GRANO SECO
Maíz	20-32	Entero	0
Maíz	20-35	Molido	9
Maíz	20-30	Rolado	13
Sorgo	27-35	Molido	11
Sorgo	23-37	Rolado	14
Maíz-A ¹	25-32	Molido	11
Sorgo-A¹	23-30	Molido	14

¹ Se añadió ácido propiónico al 1%.

Este procedimiento funciona bien sobre todo con el sorgo, produciendo una mejoría en la ganancia de peso y en la conversión alimenticia como lo muestra el Cuadro 11 en comparación con los resultados que se obtienen con el ganado vacuno alimentado con dietas muy concentradas en las que se utiliza grano entero roloado en seco.³⁵

Cuadro 11. Efecto del procesamiento de granos en la productividad de novillos³⁵

TRATAMIENTO	ganancia diaria promedio, KG	Ingestión de alimento diaria, kg	RELACIÓN ALIMENTO/GANANCIA, KG
Mijo, roloado en seco	1.28	10.31	8.02
Mijo, hojueleado al vapor	1.41	10.60	7.64
Sorgo grano, roloado en seco	1.00	8.26	8.21
Sorgo grano, reconstituido	1.20	8.40	7.02
Cebada, roloado en seco	1.31	9.44	7.22
Cebada, hujueleado al vapor	1.41	10.31	7.32
Maíz, roloado en seco	1.38	9.17	6.70
Maíz, cocinado al vapor	1.52	9.53	6.33
Maíz entero reconstituido	1.18	9.31	7.85
Maíz, hojueleado al vapor	1.20	9.22	7.66
Maíz entero	1.25	7.01	5.62

1.4.2.1. Procesos que involucran alta humedad en los granos

1.4.2.1.1. Grano remojado

Los ganaderos han utilizado desde hace mucho el grano remojado en agua durante 12 a 24 horas. El remojo, a veces con calor, suaviza el grano, el cual se hincha durante el proceso; esto lo convierte en un producto aceptable que se debe pasar por los rodillos antes de usarlo en las raciones de finalización. Sin embargo los resultados de investigación no muestran ninguna mejoría marcada en la productividad animal cuando se le compara con otros métodos. Las necesidades de espacio, los problemas de manejo y la posibilidad de que se fermente han desalentado su uso a gran escala.³⁵

1.4.2.1.2. Grano de alta humedad

El grano de alta humedad se cosecha cuando se tiene un alto contenido de humedad (20-35%) y se almacena en un silo para conservar el grano, el cuál se echaría a perder a menos que se le ensile o se le trate con compuestos químicos. El grano se puede moler antes del ensilaje o moler o prensar antes del suministrarlo al ganado. Éste es un procedimiento especialmente útil cuando las condiciones climáticas no permiten el secado normal en el campo; el procedimiento elimina la necesidad de secar el grano por métodos artificiales. Los costos de almacenamiento pueden ser relativamente elevados, pero el grano con gran cantidad de humedad produce buenos resultados de engorda intensiva de bovinos. Sobre todo, se mejora la conversión alimenticia. Los granos húmedos ensilados no son fáciles de vender o transportar como los granos que no se conservan con este método.³⁵

1.4.2.1.3. Germinación de granos

La germinación de los granos (en charolas húmedas) logra un aumento en la calidad de proteína del grano a costa de su contenido energético; esto sucede porque durante la germinación, lo que ocurre en un lapso de 14 días, las proteínas

almacenadas cambian su estructura para iniciar la síntesis de las proteínas del embrión de la planta, reacciones que emplean una gran cantidad de energía. Los granos germinados pierden, por tanto, mucho de su valor energético original, con una ganancia en peso por agua, por lo que deben utilizarse más como un recurso forrajero (ya que granos son de estupenda calidad), que como suplemento energético. La cebada es de los granos más populares para ser germinados, seguida de la avena y trigo; el sorgo, en cambio, presenta problemas asociados a la germinación, como lo son el aumento de taninos y de cianatos.³⁵

1.4.2.1.4. Conservación con ácido de los granos de alta humedad

Con el aumento en el costo de los combustibles, ha crecido el interés por eliminar el secado artificial de los granos de cereales recién cosechados. Los datos obtenidos con la cebada o el maíz en cerdos y los estudios con el maíz o sorgo en el ganado vacuno ofrecen expectativas para el uso de ácidos en la conservación de granos con mucha humedad. La mezcla cuidadosa de 1 a 1.5% de ácido propiónico, mezclas de ácido acético-propiónico o ácido fórmico-propiónico con los granos enteros de maíz u otro cereal con mucha humedad (20-30%), retarda la proliferación de hongos y su descomposición sin afectar de manera notable la productividad animal en comparación con la obtenida con granos secos.³⁵

1.4.2.1.5. Tratamiento de granos para alimentación de rumiantes

El tratamiento del grano se hace principalmente para mejorar la digestibilidad y la eficiencia de utilización. El mejoramiento en la utilización animal se obtiene por diversos medios que rompen la cascarilla o la cubierta de cera de la semilla y mejoran la digestibilidad del almidón que se encuentra en el endospermo. Algunos métodos proporcionan un tamaño de partícula más favorable o una densidad que facilita el paso óptimo a través del rumen y que puede mejorar la aceptabilidad. Para que un método sea efectivo, debe: a) disminuir el desperdicio, b) incrementar el consumo y el índice de ganancia de peso o c) utilizarse con mayor eficiencia. Se espera que el grano produzca mayores ganancias por unidad de costo cuando la

ingestión de alimento es alta. Los animales que se alimentan con dietas de mantenimiento generalmente no se les proporciona mucho grano y cualquier mejora en la eficiencia no reintegraría el costo adicional del proceso. El Cuadro 12 ejemplifica los efectos en conversión alimenticia, utilizando los diferentes métodos de procesamiento para granos, donde reconstitución y ensilaje obtuvo ganancias diarias de 1.15 Kg. ^{35,36,37}

En las dietas altas en grano, éstas pueden constituir del 60 al 95% de la ingestión total en dietas de finalización para rumiantes. Los beneficios del tratamiento de los granos se pueden mostrar en forma clara, en la mayoría de los casos, cuando se suministran grandes cantidades de grano en forma libre. ^{35,36,37}

Cuadro 12. Efectos del procesamiento de alimentos de maíz y sorgo en la ganancia diaria y la conversión alimenticia. ³⁶

MÉTODO	MAIZ		SORGO	
	GANANCIA, ^a KG	CA, ^b KG	GANANCIA, ^a KG	CA, ^b KG
Molido en seco	1.19	2.63	1.13	2.76
Hojueleado al vapor	1.22	2.43	1.20	2.54
Reconstituido	1.18	2.42	1.15	2.42
Molido, ensilado	1.17	2.33	1.19	2.51
Tratado con ácido	1.22	2.52	1.11	2.54

^a Datos de Schake y Bull

^b CA = conversión alimenticia (alimento/ganancia) ³⁶

1.4.3. Proceso de ensilaje

El objetivo fundamental del empleo de la técnica de ensilaje es conservar al máximo la calidad nutricional presente en el alimento al momento de la recolección, asegurando además que el alimento sea bien consumido.^{38,39}

El ensilaje facilita la recolección del alimento en condiciones extremas, en que es difícil utilizar otra forma de conservación, además puede ser empleado en forrajes en que no es posible el henificado como el maíz o en subproductos de gran interés como alimento, pero que de otra forma se estropearían o perderían una gran parte de su valor nutritivo. Mediante el ensilaje se puede conseguir una conservación adecuada de los alimentos, con rendimientos elevados en los animales que lo consumen.^{38,39}

El conocimiento de los procesos químico-biológicos que se producen en el alimento ensilado como el de los factores que afectan el proceso son de gran importancia para tener buenos resultados y eficacia de esta técnica de conservación.^{38,39}

1.4.3.1. Principios básicos del proceso de ensilaje

El propósito, es conservar los alimentos con un mínimo de pérdidas de materia seca (MS) y de nutrientes, mantener una buena palatabilidad por el ganado y sin que se produzcan durante el proceso sustancias que puedan ser tóxicas para la salud del animal.^{38,39}

El ensilaje permite, por otra parte, aprovechar el superávit de forraje producido durante la primavera, y a veces en el otoño y así suministrarlo durante las épocas de escasez del invierno.^{38,39}

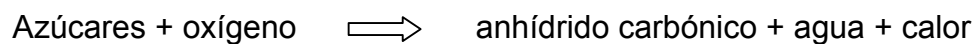
El alimento prensado en el interior del silo experimenta una serie de transformaciones bioquímicas que permiten su conservación en el tiempo, en donde es necesario tener dos condiciones para lograr un ensilado de alta calidad:
^{38,39}

1. Conseguir y mantener en el silo condiciones de anaerobiosis (ausencia de oxígeno), con el fin de limitar las pérdidas por respiración y evitar el desarrollo de los microorganismos aerobios (los que tienen necesidad de oxígeno para su crecimiento) putrefactivos del alimento. Para ello es necesario realizar un rápido llenado del silo, una compactación adecuada y cubrirlo con un plástico.^{38,39}
2. Impedir el desarrollo de la flora butírica, ya que descompone los aminoácidos en amoníaco, anhídrido carbónico, ácidos grasos volátiles y en ciertos compuestos nitrogenados como las aminas, que pueden ser tóxicas.^{38,39}

Para entender la importancia de estas dos condiciones es necesario analizar los procesos químico-biológicos que se desarrollan en el forraje cuando éste es ensilado.^{38,39}

Acción de las enzimas de la planta. Las enzimas son elementos químicos contenidos en las plantas, que tienen la propiedad de disociar los constituyentes de los vegetales, en otros más simples. En los ensilados su acción tiene lugar sobre los procesos respiratorios y sobre la descomposición de glúcidos y proteínas.^{38,39}

Respiración celular: El material verde en el silo continúa respirando, absorbiendo oxígeno y eliminando anhídrido carbónico, con liberación de calor:



Esta respiración ocasiona una pérdida de materia seca y sobre todo reduce el contenido de azúcares de la planta, lo que perjudica el desarrollo posterior de la flora benéfica del ensilado, la flora láctica.^{38,39}

Un aumento de temperatura elevado (40° C) nos indica que ha tenido lugar una entrada de oxígeno en el interior del silo, que va a provocar importantes pérdidas de materia seca en forma de azúcares (mínimo de un 5%) con el consecuente riesgo de una fermentación láctica insuficiente. De aquí la importancia que en los silos se tiene que realizar una correcta compactación.^{38,39}

Hidrólisis de glúcidos: Los glúcidos solubles (azúcares simples y fructosanas) de los forrajes y alimentos que se ensilan, y que representan una cifra variable entre 5 y 25% de su materia seca, son rápidamente hidrolizados por la acción de las enzimas en glucosa y fructosa, que junto con los ácidos orgánicos cítrico y málico son las principales fuentes de energía de los microorganismos, y en especial, de las bacterias lácticas.^{38,39}

Existen, por otra parte, carbohidratos que no pueden ser utilizados directamente por la flora láctica, a menos que sean descompuestos previamente en glúcidos más simples. Entre ellos se encuentra el almidón de los cereales, que precisa ser hidrolizado en maltosa por la acción de amilasas.^{38,39}

Hidrólisis de proteínas: Las materias nitrogenadas de los vegetales están constituidas en su mayor parte por proteínas (70-80% del total) y en menor cantidad por aminoácidos libres, aminos y formas minerales (iones nitrato y amonio). Las enzimas proteasas hidrolizan las proteínas vegetales en péptidos y aminoácidos. Esta proteólisis disminuye a medida que el medio se acidifica, y se detiene cuando el pH desciende por debajo de 4, esto explica que incluso en buenos ensilados, el contenido en nitrógeno soluble sea mayor que el de la planta verde y que pueda representar más del 50% del nitrógeno total.^{38,39}

Acción de los microorganismos. Esta microflora se desarrolla en el silo empleando como sustancia nutritiva el jugo liberado por las células vegetales cuando éstas mueren por falta de oxígeno (plasmólisis). Este proceso es más rápido cuanto más finamente picado es el material y menor sea el pH del medio.^{38,39}

La flora bacteriana comprende diversas especies, que se caracterizan por sus distintas reacciones frente al medio ambiente y por los productos finales obtenidos de su actividad. Al comienzo y mientras existe suficiente oxígeno, se desarrollan las bacterias aerobias estrictas, que desaparecen rápidamente y que no contribuyen a la conservación del ensilado.^{38,39}

Las primeras bacterias en desarrollarse son las bacterias coliformes que son anaerobias facultativas, por lo que pueden desarrollarse en presencia de oxígeno. Transforman los azúcares en ácido acético y anhídrido carbónico, produciendo pequeñas cantidades de ácido fórmico y de ácido láctico y contribuyen así a un comienzo de acidificación del ensilado, pero con una baja eficacia por pérdidas en forma de gas.^{38,39}

Dichas bacterias no son de interés, pues degradan también los aminoácidos en amoníaco y ácidos grasos volátiles o en aminas. Su acción es de corta duración al quedar detenido su desarrollo cuando el pH desciende por debajo de 4.5, valor que alcanza con rapidez cuando la flora láctica se desarrolla normalmente.^{38,39}

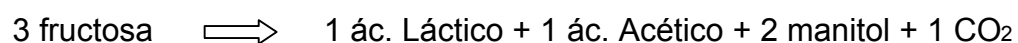
En segundo lugar se desarrollan las bacterias lácticas, microorganismos anaerobios estrictos, que son poco numerosos en un principio, pero que se multiplican muy rápidamente, constituyendo en menos de 8 días la casi totalidad de la flora del ensilado. Para ello deben encontrar en el medio las condiciones favorables para su desarrollo, es decir, ausencia total de oxígeno y presencia de azúcares en cantidad suficiente y que sean liberados rápidamente.^{38,39}

El desarrollo óptimo de las bacterias lácticas tiene lugar para valores de pH comprendidos entre 4.5 y 6.0, deteniéndose su actividad a un pH entre 3.8 y 3.2. Estas bacterias transforman los azúcares en ácido láctico, aunque con rendimiento diferente según sean homofermentativas o heterofermentativas.^{38,39}

Las bacterias homofermentativas descomponen los glúcidos originando únicamente ácido láctico, según la reacción.



Las bacterias heterofermentativas dan lugar a una menor cantidad de ácido láctico y originan productos que no son deseables en el ensilado y que dependen del tipo de azúcar fermentado:

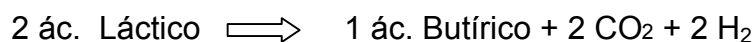


El contenido de azúcares necesario para que se produzca la cantidad de ácido láctico suficiente para disminuir el pH a 4 depende de la proporción en que se

encuentren las bacterias lácticas homo y heterofermentativas en el forraje a ensilar.^{38,39}

Cuando la cantidad de ácido láctico formado es suficiente para que el pH descienda por debajo de 4, se inhibe totalmente la actividad y desarrollo de las bacterias, incluidas las lácticas, así como la acción de las enzimas proteolíticas de la planta, que degradan las proteínas en aminoácidos. Se llega entonces a una situación de estabilidad en el ensilado que permite su conservación casi indefinida, a condición de que no haya una entrada de oxígeno.^{38,39}

Por el contrario, si el pH no desciende con rapidez o no llega a un valor bajo, debido a una cantidad insuficiente de azúcares y/o a un elevado poder tampón del forraje, se desarrollan bacterias butíricas, microorganismos anaerobios del género *Clostridium*.^{38,39}



Dos moléculas de ácido láctico originan una de ácido butírico con desprendimiento de hidrógeno gaseoso, por lo que el pH se eleva y acelera la reacción. Las especies proteolíticas atacan a los aminoácidos transformándolos bien en amoníaco, ácidos grasos volátiles y anhídrido carbónico, bien en aminas como histamina, cadaverina o putrescina que pueden ser tóxicas.^{38,39}

Las bacterias butíricas tienen una elevada sensibilidad al pH, oscilando los valores óptimos para su desarrollo entre 7 y 7.5 y deteniéndose el mismo a un pH inferior a 4. Así si el contenido en MS alcanza un 35% es suficiente un pH de 4.5 para bloquear la acción de las bacterias butíricas y en cambio se necesita bajar el pH hasta 3.8 cuando el contenido en MS es de sólo un 15%.^{38,39}

Es necesario considerar las fermentaciones debidas a mohos y levaduras, que tienen lugar en el caso de la introducción de oxígeno en el interior del ensilado. Estas fermentaciones pueden desarrollarse rápidamente cuando el contenido de materia seca es elevado o cuando se han empleado productos bacteriostáticos para su conservación. Aunque el desarrollo de estos microorganismos podría ser evitado mediante una aspersión del frente del silo con ácido propiónico o butírico.

^{38,39}

Como lo muestra el Cuadro 13, el cual se considera dos trabajos previos, Huck ³⁴ y Helm ⁴⁰, podemos obtener rangos para las principales características de fermentación del grano de sorgo reconstituido y ensilado. ^{34,40}

Cuadro 13. Principales características de fermentación del grano de sorgo reconstituido y ensilado

	<i>Huck</i> , ³⁴	Helm , ⁴⁰
pH	4.0 – 6.5	5.4 – 6.5
Nitrógeno amoniacal (%)	0.01 – 0.06	--
Ácido acético (%)	0.1 – 0.4	0.37 – 0.67
Ácido propiónico (%)	--	0.17 – 0.48
Ácido butírico (%)	--	0.08 – 0.13
Ácido láctico (%)	0.4 – 1.5	0.4 – 1.0

1.5. Digestión del almidón en alimentación de rumiantes

La digestión en el rumen de las fracciones potencialmente degradables del almidón y la proteína puede ser descrita por un modelo cinético de primer orden, definido por dos actividades simultáneas: los ritmos o velocidades de degradación (K_d) y de paso a través del rumen (K_p) cuya relación determina la proporción efectivamente digerida en el rumen ($K_d/(K_d+K_p)$) o, por el contrario, la proporción que abandonaría el rumen sin ser degradada ($K_p/(K_d+K_p)$). ⁴¹

La mayor parte de los tratamientos a que son sometidos los cereales y suplementos proteicos modifican su velocidad de degradación en el rumen (K_d) y con ello la proporción de almidón o proteína que es digerida en éste u otros tramos posteriores del tracto digestivo. Ello puede tener una importante incidencia en la eficiencia de utilización de la dieta y en la respuesta productiva del animal, dada la influencia que el lugar de digestión tiene sobre el tipo de nutrientes absorbidos. No obstante, estas variaciones en el ritmo de degradación pueden verse

compensadas por variaciones en el tiempo de retención, provocadas simultáneamente por el tratamiento.^{30,41}

En el rumen el almidón es fermentado a ácidos grasos volátiles y la proteína degradada a cetoácidos y amoníaco, en donde este último es la principal fuente de Nitrógeno para la síntesis microbiana. La intensidad de este proceso degradativo es variable y depende de la magnitud de la fracción potencialmente degradable y de su tiempo de retención en el rumen.^{41,42}

Otros factores, como el nivel de alimentación o la proporción de forraje:concentrado en el caso de dietas integrales, pueden hacer variar el tiempo de retención y por consiguiente la digestibilidad ruminal.²⁷ No obstante, es de resaltar que la influencia del tiempo de retención varía dependiendo del ritmo de fermentación. Esta diferencia se puede ejemplificar con maíz y cebada, ya que esta última fermenta muy rápidamente, es de esperar que las variaciones en el tiempo de retención tengan un efecto más elevado sobre la degradabilidad del maíz que sobre la de la cebada.^{41,43}

1.5.1. Utilización del almidón

Los granos de cereales contienen entre un 70 y un 80% de almidón, que se encuentra en el endospermo, formando gránulos compuestos principalmente por amilopectina, el componente más abundante del almidón (70-80%), cuya estructura ramificada, comprende zonas organizadas o cristalinas, compuestas por los residuos lineales de α -1,4 glucosa, y zonas amorfas ricas en residuos de α -1,6 glucosa o puntos de ramificación. El componente minoritario del almidón, la amilosa (polímero lineal de α -1,4 glucosa), se encuentra unido a la estructura de la amilopectina, la cual es más digestible en el tracto gastrointestinal, por sus puentes de hidrógeno, localizados fundamentalmente en las regiones amorfas.⁴¹

La influencia de esta estructura sobre la digestibilidad del almidón y el efecto del procesado del grano ha sido revisada detalladamente por Rooney y Plugfelder.²⁴

Las regiones cristalinas de la molécula de almidón son resistentes a la entrada de agua y al ataque enzimático, mientras que las regiones amorfas son más permeables al agua y susceptibles a la acción enzimática que, generalmente, comienza en esta región, aunque se encuentra restringida por los enlaces de la amilosa con la amilopectina.^{20,24,41}

1.5.2. Gelatinización del almidón

La aplicación de suficiente energía para romper los puentes de hidrógeno intermoleculares provoca, la gelatinización del almidón o pérdida irreversible de su estructura original. Durante la gelatinización, los gránulos de almidón aumentan su absorción de agua, se expanden, exudan parte de la amilosa y aumentan su susceptibilidad a la hidrólisis enzimática.^{15, 16} Los procesamientos del grano de sorgo, como: molido y el rolado en seco, producen una disminución del tamaño de partícula que aumenta la superficie de exposición de los gránulos de almidón al ataque enzimático, pero la acción mecánica del tratamiento es suficiente para producir un cierto grado de gelatinización que aumenta la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática.^{41, 43}

La gelatinización comienza por la ruptura de enlaces con la amilosa en la zona amorfa, mientras que la penetración de calor y agua en la región cristalina ocurre más lentamente, ayudada por la mayor plasticidad de la región amorfa. En los tratamientos húmedos, la presencia de agua aumenta la plasticidad de las regiones amorfas, favoreciendo considerablemente la fragmentación de las regiones cristalinas. Así, la combinación de calor y humedad provoca un alto grado de gelatinización del almidón que, unido a la mayor superficie de exposición lograda al aplastar el grano húmedo y caliente, aumenta considerablemente su degradación enzimática y su velocidad de fermentación ruminal según la intensidad del tratamiento.^{27,30,31,33,41,42,44}

En ausencia de calor, el ensilado de maíz con alta humedad (25%) y la reconstitución del sorgo parecen provocar resultados comparables a los observados con el rolado al vapor, que se atribuyen, en el primer caso, a la inmadurez de la matriz proteica que protege los gránulos de almidón en el endospermo o a su degradación proteica, en el segundo. Las observaciones sobre un incremento paralelo en la degradación proteica y del almidón con el tiempo de reconstitución parecen apoyar esta hipótesis.^{32,44} Sin embargo, el rolado al vapor disminuye la degradación proteica, aunque aumenta la gelatinización del almidón, lo que sugiere la existencia de mecanismos de acción diferente para el procesado húmedo en frío y en caliente.^{31,41}

La eficacia del procesado varía no sólo en función del método, sino también de la fuente de almidón y de la especie animal. Los cereales difieren considerablemente en su susceptibilidad a la degradación ruminal, como se ilustra en la Figura 8 aunque estas diferencias no se reflejan en la digestibilidad aparente en el total del tracto digestivo, debido al efecto compensatorio que ejerce la fermentación en el intestino grueso.⁴¹

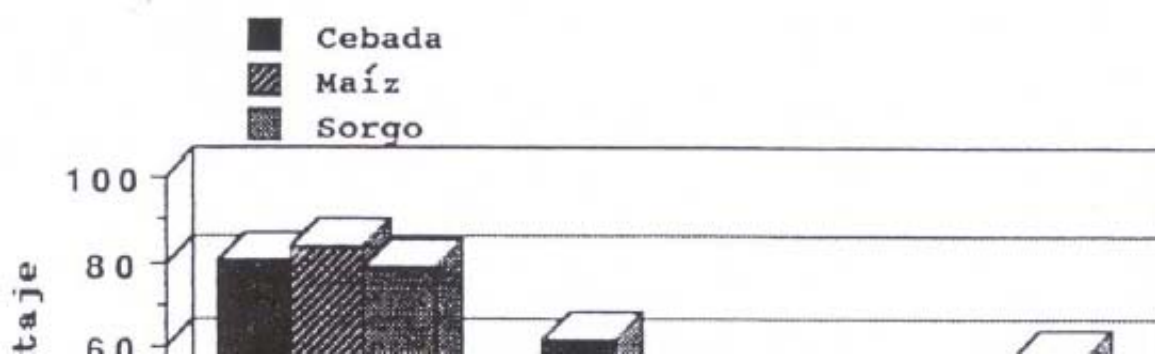


Figura 8. Digestibilidad del almidón de la cebada, el maíz y el sorgo, en el total del tracto digestivo y en el rumen y proporción que pasa al intestino sin degradar ⁴¹

La elevada degradabilidad de la cebada y el trigo limitan su potencial de respuesta al procesado, cuyo efecto es prácticamente despreciable con estos granos. Sin embargo el maíz, que es más lentamente degradado, y el sorgo, que es todavía más resistente a la degradación, ofrecen mayor potencial de respuesta. ^{31,41}

El procesado en caliente y húmedo permite aumentar su digestibilidad ruminal en un 20 y 30%, respectivamente, lo que se traduce en mejoras del índice de conversión del orden del 10%. No obstante, en el caso del sorgo, se han observado importantes diferencias vitales en la digestión ruminal e intestinal (Streeter, *et al.* ⁴⁵) y en su respuesta a la reconstitución (Hibberd, *et al.* ³³).

1.6. JUSTIFICACIÓN:

Trabajos previos, demuestran que existen cambios importantes en la estructura del grano de sorgo, al someterlo a procesos que involucran humedad y temperatura, como es el caso de reconstitución y ensilaje, que mejoran la digestibilidad del almidón durante su paso por el tracto digestivo en rumiantes. Pero debido a que no existe información precisa, acerca de las características óptimas en relación a tamaño de partícula, nivel de humedad y días de ensilaje, para el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo, sobre la digestión del almidón y características de fermentación, se realizó el presente estudio.

1.7. HIPÓTESIS:

La digestión *in vitro* del almidón y características de fermentación del grano de sorgo reconstituido y ensilado se modifican por el tamaño de partícula, nivel de humedad, y el tiempo de ensilaje.

1.8. OBJETIVOS:

1. Determinar el efecto del nivel de humedad, tamaño de partícula y tiempo de ensilaje en la digestibilidad *in vitro* del almidón de grano de sorgo reconstituido y ensilado.
2. Determinar el efecto del nivel de humedad, tamaño de partícula y tiempo de ensilaje en las características de fermentación del grano de sorgo (pH, ácido láctico, ácidos grasos volátiles y nitrógeno amoniacal).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Localización

El trabajo se desarrolló en el laboratorio de Bromatología del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM.

2.2. Metodología

Se elaboraron 72 microsilos, cada uno representó una unidad experimental y se asignaron a un diseño completamente al azar, con arreglo factorial 2x3x3 para evaluar el efecto del tamaño de partícula (2 niveles: entero (grano sin procesar) y quebrado (pasado a través de molino, marca Tekator para una fragmentación de aproximadamente 10 partículas por grano), nivel de humedad (3 niveles: 25, 30 y 35 %), y tiempo de almacenaje (3 niveles: 0, 21 y 42 días). Con cuatro repeticiones por tratamiento para evaluar la digestión *in vitro* del almidón y las características de fermentación de sorgo grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) reconstituido y ensilado.

2.2.1. Cálculo del nivel de humedad

Considerando el nivel de humedad del lote de sorgo utilizado en el estudio, se calculó la cantidad de agua a utilizar para llevarlo a los niveles de humedad deseados en el experimento: 25%, 30%, 35%

Ejemplo: 100 gr. sorgo con 7% humedad, tiene 93% Materia seca (MS). Y deseamos alcanzar 25% Humedad

$$\begin{array}{rcl} 100 \text{ gr. sorgo} & \text{-----} & 93\% \text{ MS} \\ X & \text{-----} & 75\% \text{ MS} \\ X = 80.64 \text{ gr.} & & \\ 80.64 - 100 & = & 19.36 \text{ gr. H}_2\text{O} \\ 80.64 \text{ gr. sorgo} & \text{-----} & 19.36 \text{ gr. H}_2\text{O} \\ 1000 \text{ gr. sorgo} & \text{-----} & X \end{array}$$

$$X = 240.08 \text{ gr. H}_2\text{O}$$

Comprobación:

100 gr. Mezcla ----- 100%

Sorgo con 7% de Humedad

1000 gr. Sorgo + 240.08 gr. H₂O = 1240.08 gr. Mezcla total

1240.08 gr. Mezcla = 100%

70 gr. H₂O = 5.64 %

240.08 gr. H₂O = 19.36 %

Sumando los porcentajes 5.64 + 19.36 = **25% Humedad**

En el Cuadro 14 se muestran los gramos de agua necesarios para incrementar la humedad, en diferentes porcentajes de Materia Seca de granos de sorgo.

Cuadro 14. Gramos de agua necesarios para incrementar los niveles de humedad: 25%, 30%, 35% de un 1 Kg. de grano de sorgo con diferentes porcentajes de humedad

% HUMEDAD SORGO	25%	30%	35%
4	280.06	371.36	476.98
5	266.62	357.22	461.56
6	253.29	342.82	446.13
7	240.08	328.55	430.82
8	226.7	314.23	415.43
9	213.3	300.05	399.97
10	200.05	285.84	384.66
11	186.66	271.45	369.3
12	173.3	257.23	353.91
13	159.96	242.85	338.51
14	146.66	228.65	323.1
15	133.4	214.33	307.7
16	120.07	200.05	292.32
17	106.68	185.11	276.98

A continuación en el Cuadro 15, se muestran los tratamientos evaluados en el presente estudio, cada uno con cuatro repeticiones.

Cuadro 15. Tratamientos evaluados en el estudio

	Partícula	% Humedad	Días
T1	Entero	25	0
T2	Entero	25	21
T3	Entero	25	42
T4	Entero	30	0
T5	Entero	30	21
T6	Entero	30	42
T7	Entero	35	0
T8	Entero	35	21
T9	Entero	35	42
T10	Quebrado	25	0
T11	Quebrado	25	21
T12	Quebrado	25	42
T13	Quebrado	30	0
T14	Quebrado	30	21
T15	Quebrado	30	42
T16	Quebrado	35	0
T17	Quebrado	35	21
T18	Quebrado	35	42

Los microsilos se elaboraron con grano de sorgo comercial, (Jilotepec, Edo. de México). Se utilizaron frascos de polietileno de 10 cm. de ancho por 19 cm. de alto, con capacidad de 2 kg. El grano se compacto lo mejor posible con la utilización de una botella de fondo plano. A cada microsilo se le colocó una válvula de Bunsen en la tapa de rosca para extraerle el aire con una bomba de vacío. Figuras 9 y 10. Se sellaron con silicón (Sista, Henkel Mexicana, Cat 1629).



Figura 9. Material utilizado para la elaboración de los microsilos



Figura 10. Compactación de los microsilos con una botella de fondo plano y extracción de aire con la bomba de vacío

Los microsilos se almacenaron a temperatura ambiente (25 a 27 °C) en un lugar oscuro y se abrieron en los tiempos ya señalados.

Se eliminó la capa superficial de los microsilos y se extrajo una cantidad de 150 g de la parte del centro de cada microsilo, ésta se mezcló y se utilizaron 10 g para la determinación inmediata de pH y el resto se colocó en bolsas de polietileno sellables y se almacenaron a -20°C para posteriores análisis.

Se obtuvo una muestra contractual del grano sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en estudio, con la finalidad de determinar algunas características físicas: peso de mil granos, densidad absoluta del grano, proporción de endospermo duro:blando.

2.2.2. Peso de mil granos

Esta información se recabo contando mil granos de sorgo para posteriormente pesarlos en báscula analítica marca Sartorius BL120S.

2.2.3. Densidad absoluta

Se determinó mediante la técnica de Picnometría de Gas la cual nos permite determinar la densidad absoluta de partículas sólidas, (figura 11) en el IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Paseo Cuauhnáhuac 8532, Jiutepec, Morelos 62550, México).

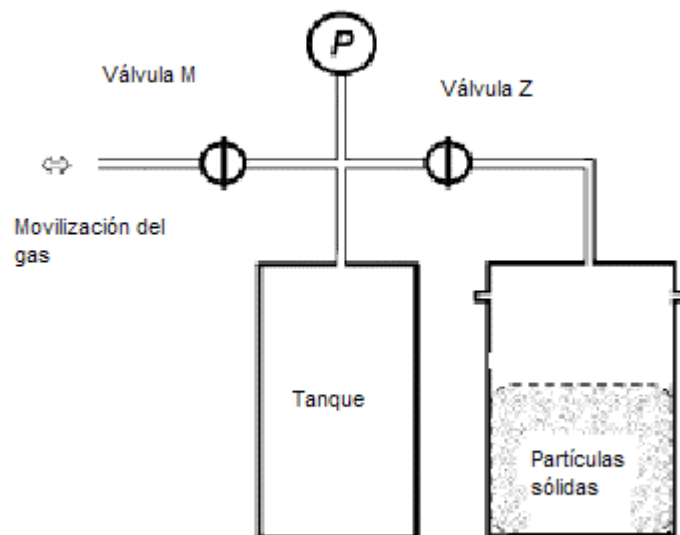


Figura 11. Modelo del picnómetro de gas utilizado para determinar la densidad del grano

2.2.4. Proporción de endospermo duro:blando

Se determinó la proporción de endospermo duro:blando del grano de sorgo mediante una modificación de la técnica de Kirleis.⁴⁶ La cual se describe a continuación, se obtuvo de la muestra contractual granos de sorgo enteros (100), eliminando los incompletos. Se prepararon portaobjetos cubriendo una de sus superficies con una resina epóxica conocida como poliéster, inmediatamente se colocaron, con ayuda de pinzas de disección 10 granos de sorgo por portaobjetos, dejando 1 cm. aproximadamente por grano, divididos en dos columnas, como se observa en la Figura 12. Tomando el germen como referencia. La mitad de cada grano sobresalió del poliéster y el resto se encontraba sumergido. Todos los portaobjetos se dejaron polimerizar durante 24 hrs. a temperatura ambiente. Después de transcurrido este tiempo, cada grano fue cortado con un bisturí No 22 por la mitad, retirando la parte que sobresalía del poliéster, para así exponer el centro de cada grano, dejando ver el germen y endospermo duro y blando. Se seleccionaron los 20 mejores granos evaluando integridad de la superficie de corte, (poca irregularidad en los bordes). Se tomó una fotografía por cada grano con una cámara digital Canon Power Shot S70 y un microscopio estereoscópico Leica Z100 con un adaptador de cámara Leica DS150, enfocando manualmente cada toma sin flash y ajustando el contraste de blancos al modo exterior (Figura 13). Cada fotografía fue editada utilizando una computadora personal y el software Adobe Photoshop Elements. Delimitando primero con color negro el grosor de la línea de 5 píxeles, el área de endospermo duro del germen, después el área del endospermo blando. Con la función de Barra mágica se seleccionó el área deseada para cuantificar con mega píxeles la superficie deseada. Ejemplificadas en la Figura 14, delimitando el germen (izquierda) y cuantificación de endospermo blando o harinoso (derecha). Por medio de una sustracción matemática se obtuvo el número de píxeles del endospermo duro y se calculó el porcentaje de endospermos respecto al endospermo total.



Figura 12. 10 granos de sorgos montados en laminillas para la determinación de proporción de endospermos



Figura 13. Fotografía digital del híbrido de sorgo estudiado



Figura 14. Fotografías digitales, editadas en Adobe Photoshop para obtener la proporción de endospermos en grano de sorgo

2.3. Análisis de laboratorio

Se realizaron los siguientes análisis:

2.3.1. Concentración de pH

Al abrir los microsilos se obtuvo una muestra de 10 g. de grano ensilado del centro, se mezcló con 100 ml. de agua destilada desionizada por dos horas y se filtró utilizando cuatro capas de gasa. El valor de pH se determinó utilizando un potenciómetro marca ThermoOrion con electródo combinado.⁴⁷

2.3.2. Cuantificación de ácidos grasos volátiles (acético, propiónico y butírico) y ácido láctico

Se congelaron muestras para determinar y cuantificar los ácidos grasos volátiles y ácido láctico mediante un cromatógrafo de gases marca PerkinElmer modelo AutoSystem XL. Técnica detallada en el anexo I, para ácidos grasos volátiles. Y anexo II para ácido láctico.^{48,49,50}

2.3.3. Determinación de Materia seca

Las muestras de grano de sorgo ensilado fueron deshidratadas en una estufa de aire forzado a 55° C por 48 h para determinar el contenido de MS. AOAC, 1990.⁵¹

2.3.4. Determinación de Nitrógeno total (NT)

Contenido de Nitrógeno Total en las muestras. AOAC, 1990.⁵¹

2.3.5. Determinación de Nitrógeno amoniacal (NH₃)

Contenido de Nitrógeno Amoniacal.⁴⁷ Técnica detallada en el anexo III.

2.3.6. Determinación de digestibilidad enzimática *in vitro* del almidón

Digestibilidad *in vitro* del almidón mediante la técnica descrita por Rodríguez.⁵²
Técnica detallada en el anexo IV.

2.3.7. Aislamiento e identificación del género micótico

La identificación del hongo que se encontró en 5 microsilos de grano entero, se realizó en el laboratorio de Micología de la FMVZ.

Se sembró el microorganismo en cajas de petri con gel agar Sabouraud, y se utilizó la técnica de punto aislado. Una vez transcurridos los 10 días de aislamiento, se tomo una muestra y se tiño, con la tinción de Gram modificada (reed). Después se realizó la tinción de lactofenol azul de algodón, con el objetivo de determinar las estructuras morfológicas y su identificación. Se observaron las laminillas al microscopio marca Leica, con el objetivo seco fuerte (40x). Las características morfológicas son constantes para cada especie en idénticas condiciones de cultivo. Para su descripción se consideraron las siguientes características: tiempo de crecimiento, tamaño, color, borde, superficie, pigmentación, hemólisis y estructura interna.^{53,54}

2.4. Análisis estadístico

Los datos se analizaron utilizando el procedimiento GLM de SAS (1998) de acuerdo con un diseño completamente al azar, con arreglo factorial 2x3x3 para tamaño de partícula, % de humedad y tiempo de almacenaje. Se utilizaron cuatro repeticiones por tratamiento y la unidad experimental fue el microsilo.^{55,56,57}

El modelo estadístico fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + (A*B)_{ij} + C_k + (A*C)_{ik} + (B*C)_{jk} + (A*B*C)_{ijk} + E_{ijkl}$$

Donde:

Y_{ijkl} = variable de respuesta

μ = media general

A_i = efecto del i-ésimo tamaño de partícula

B_j = efecto del j-ésimo porcentaje de humedad

$(A*B)_{ij}$ = efecto de la interacción del i-ésimo tamaño de partícula por el del j-ésimo porcentaje de humedad

C_k = efecto del k-ésimo tiempo de almacenaje

$(A*C)_{ik}$ = efecto de la interacción del i-ésimo tamaño de partícula por el del k-ésimo tiempo de almacenaje

$(B*C)_{jk}$ = efecto de la interacción del j-ésimo porcentaje de humedad por el del k-ésimo tiempo de almacenaje

$(A*B*C)_{ijk}$ = efecto de la triple interacción del i-ésimo tamaño de partícula por el j-ésimo porcentaje de humedad por el k-ésimo tiempo de almacenaje

E_{ijkl} = error aleatorio

En los casos donde se encontró triple interacción ($P < 0.05$), las diferencias entre medias fueron evaluadas mediante la prueba de Tukey.^{55,56,57}

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Características físicas del grano de sorgo utilizado en el estudio:

3.1.1. Peso de mil granos

El lote de grano de sorgo utilizado en el presente estudio presentó un valor de 29.54 g/1000 granos, lo cual concuerda con los valores reportados por Buffo, *et al.*⁵⁸; Dorsey, *et al.*⁵⁹. Los cuales encontraron valores de (24.88-35.88 y 25.8-33.4 g/1000 granos respectivamente). El peso de mil granos dependerá del tamaño del grano y éste a su vez del híbrido utilizado. Afectando directamente la digestibilidad, es decir a mayor peso del grano, mayor proporción de endospermo duro o vítreo por lo tanto menor porcentaje de digestibilidad del almidón contenido en dicho grano. (Dorsey, *et al.*⁵⁹, Correa, *et al.*⁶⁰, Philippeau, *et al.*⁶¹).

3.1.2. Densidad absoluta del grano

El valor de 1.322 g/cm³ obtenido, coincide con los valores encontrados en sorgo grano por Buffo, *et al.*⁵⁸ (1.317-1.392 g/cm³), Chang, *et al.*⁶² (1.295-1.471 g/cm³) sin embargo es mayor al valor de densidad reportado por Tamari, *et al.*⁶³ (1.1 g/cm³) quién no especifica el tipo de cereal utilizado. La densidad absoluta se ha relacionado con la digestibilidad del almidón en el maíz (Dorsey, *et al.*⁵⁹, Correa, *et al.*⁶⁰, Philippeau, *et al.*⁶¹, Philippeau and Landry⁶⁴) y con el sorgo (Buffo, *et al.*⁵⁸ Pedersen, *et al.*⁶⁵), quienes encontraron que a una mayor densidad absoluta del grano mayor es el porcentaje de endospermo duro o vítreo y menor la digestibilidad del almidón.

3.1.3. Relación endospermo duro:blando

Se utilizó la técnica de Kirleis⁴⁶, modificada utilizando 20 granos enteros. En el Cuadro 16 y Figura 15 se muestran los valores individuales de los granos evaluados en megapixeles y el porcentaje de endospermo duro y blando.

Explicando la relación de endospermo que existió en el híbrido de grano de sorgo utilizado.

Cuadro 16. Resultados de la relación de endospermo duro:blando

# Muestra	Endospermo total (megapixeles)	Endospermo blando (megapixeles)	Endospermo duro (megapixeles)	Endosp. Blando (%)	Endosp. Duro (%)	100 (%)
e 01	1258913	485769	773144	38.59	61.41	100.00
e 02	1487056	946604	540452	63.66	36.34	100.00
e 04	1129633	337892	791741	29.91	70.09	100.00
e 05	1248213	658690	589523	52.77	47.23	100.00
e 09	1136677	422625	714052	37.18	62.82	100.00
e 14	1228101	590742	637359	48.10	51.90	100.00
e 21	1267938	492712	775226	38.86	61.14	100.00
e 27	1094288	237606	856682	21.71	78.29	100.00
e 31	1416563	716573	699990	50.59	49.41	100.00
e 32	1339588	554641	784947	41.40	58.60	100.00
e 33	1221360	389168	832192	31.86	68.14	100.00
e 34	1408421	639202	769219	45.38	54.62	100.00
e 37	1090415	583804	506611	53.54	46.46	100.00
e 43	1351311	681282	670029	50.42	49.58	100.00
e 45	1299137	691449	607688	53.22	46.78	100.00
e 49	1341947	584509	757438	43.56	56.44	100.00
e 50	1142804	512519	630285	44.85	55.15	100.00
e 53	1320243	561054	759189	42.50	57.50	100.00
e 55	1195268	765865	429403	64.07	35.93	100.00
e 56	1213564	606826	606738	50.00	50.00	100.00
n=20	1259572	572976.6	686595.4	45.109	54.891	100

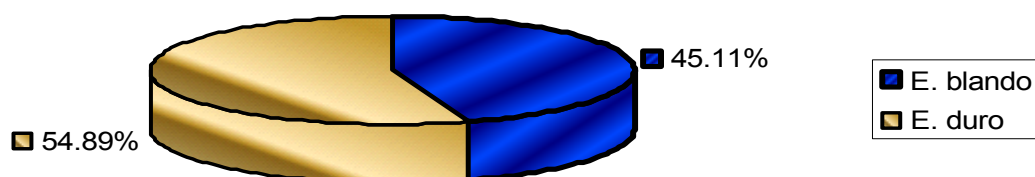


Figura 15. Relación de endospermo duro:blando

Con los valores obtenidos de acuerdo a la relación endospermo duro:blando (54.89%:45.11%) de este híbrido de sorgo, y al compararlo con Kirleis, *et al.* ⁴⁶ (45.1-62.5% de endospermo duro) se observan que concuerdan los valores determinados. Por lo que esta técnica modificada es precisa y permite obtener información acerca de la relación de endospermo duro:blando con la que cuenta el grano de sorgo. La relación de endospermo duro:blando en un grano de sorgo se ha relacionado con la digestibilidad del almidón en el maíz (Dorsey, *et al.* ⁵⁹, Correa, *et al.* ⁶⁰, Philippeau, *et al.* ⁶¹ Philippeau and Landry ⁶⁴, Corona, *et al.* ⁶⁶). En donde a mayor proporción de endospermo duro en maíz roloado en seco se observa una menor digestión del almidón debido a que en esta porción la matriz proteica que envuelve los gránulos de almidón es mas densa y limita su disponibilidad y con el sorgo (Pedersen, *et al.* ⁶⁵ Kirleis, *et al.* ⁴⁶, Li, *et al.* ⁶⁷), quienes encontraron que a una mayor proporción de endospermo duro o vítreo menor es la digestibilidad del almidón.

3.2. Características químicas:

3.2.1. Composición química del grano de sorgo

Cuadro 17. Composición química del grano de sorgo utilizado en el experimento (BS100)

Nutriente	BS100 (%)
Materia seca ⁵¹	95.5
Proteína cruda (6.25) ⁵¹	8.87
Extracto etéreo ⁵¹	4.66
Cenizas ⁵¹	2.23
Fibra cruda ⁵¹	2.34
Fibra ácido detergente ⁶⁸	5.61
Fibra neutro detergente ⁶⁸	17.28
Almidón total ⁵²	72.51

Al comparar los valores encontrados con los que reporta, Shimada ⁶⁹ (MS 89%, Mcal/Kg ED 3.44, EM 3.23, PC 8.9, FC 2.3, Ca 0.03, P 0.28) y Feedstuffs ¹⁵ (MS 89%, Mcal/Kg ED 3.31, EM 3.21, PC 11%, EE 2.8%, FC 2.0, Ca 0.04, P 0.29, CEN 1.7%, TND 71%) se observa que el valor nutricional del híbrido utilizado es mayor 6.8, 39.9, 23.74% en MS, EE y CEN respectivamente. Lo cual depende de genotipo del híbrido, las condiciones ambientales en donde es cultivado el cereal y el manejo que recibió.

3.2.2. Porcentaje de humedad

Se observó una interacción ($P < 0.0036$) tamaño de partícula y % de humedad, en donde el nivel de humedad determinado en laboratorio como se observa en el Cuadro 18, Figuras 16 y 17, no correspondió en algunos casos para grano entero, de acuerdo al nivel de agua adicionado al grano, el grano entero para el día 0, se encontraron valores de 23.8, 25.36 y 27.24% para los niveles de 25, 30 y 35% de humedad respectivamente, en contraste con grano quebrado en donde concuerdan los valores obtenidos con el estimado, lo cual indica que en el grano entero no se logró homogenizar el agua adicionada, en cambio el grano quebrado permitió una adecuada homogenización del agua adicionada en el proceso de reconstitución. La interacción ($P < 0.0001$) tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, nos indica que no correspondió la cantidad de agua adicionada para grano entero y se observa que a medida que se incrementa el tiempo de almacenaje, aumentó el % de humedad (Ver figura 16). Esto se debió a que el agua adicionada en grano entero, al almacenarlo se fue sedimentando, por los espacios que dejó, en cambio el grano quebrado absorbió bien el agua y fue homogénea su distribución. Estos resultados concuerdan con lo estudiado por Sock, *et al* ⁷⁰ quienes concluyen que el grano húmedo tiene que ser roloado o molido para obtener una mejor compactación, que la humedad es más homogénea y que en grano húmedo entero se pueden producir hongos o

deteriorarse y captar la humedad de manera irregular. Como se observa en la interacción tamaño de partícula x % de humedad ($P < 0.0036$) en donde los valores de humedad en grano quebrado concuerdan con lo estimado, (Ver figura 17).

Aunque no se evaluó de manera cuantitativa la presencia de hongos, si se observó una mayor presencia de éstos en la capa superior de algunos microsilos con grano entero, lo cual se debe a los espacios de aire que quedan entre los granos por la forma esférica del grano lo cual dificulta la compactación y para lograr una completa anaerobiosis. Se aisló e identificó el género de hongo *Aspergillus fumigatus* en cinco microsilos donde se observó la presencia de estos.

54

Cuadro 18. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en la humedad

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	23.80	0.95	4	25.78	1.460	4	29.37	0.365
	30	4	25.36	2.025	4	32.37	0.415	4	32.56	0.44
	35	4	27.24	1.46	4	33.77	0.32	4	34.79	1.15
Quebrado	25	4	25.88	0.265	4	26.44	0.22	4	25.79	0.395
	30	4	30.05	0.26	4	30.67	0.255	4	31.23	0.085
	35	4	34.96	0.435	4	34.56	0.17	4	35.02	0.215

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables: tamaño de partícula x % de humedad, con una $P < 0.0036$

Interacción entre las variables: tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, con una $P < 0.0001$

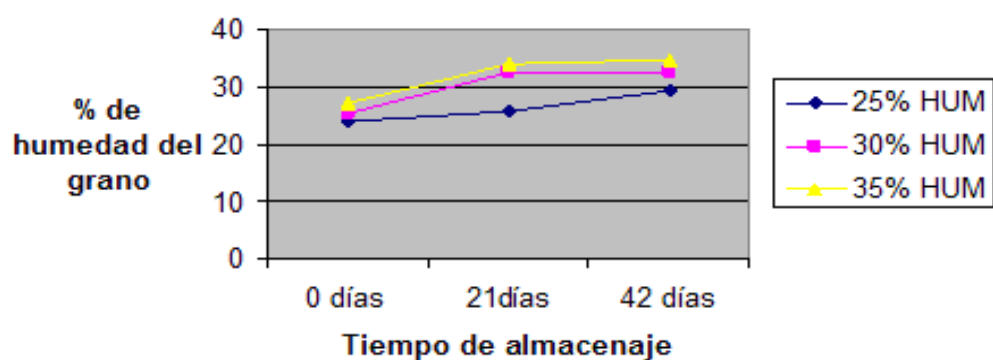


Figura 16. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de humedad en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

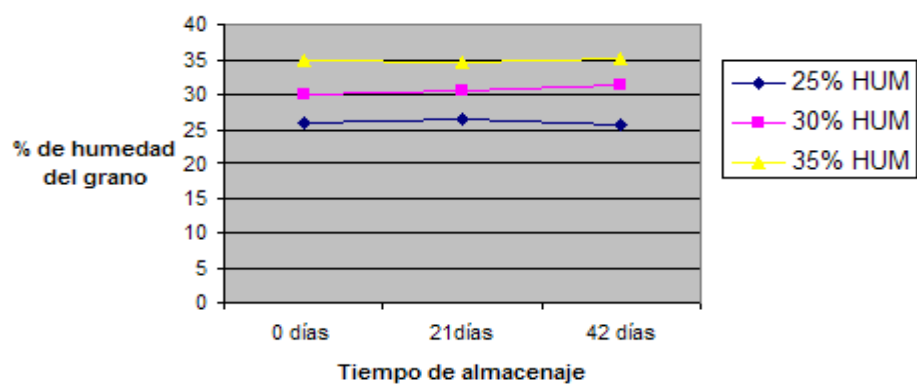


Figura 17. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de humedad en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.3. Concentración de pH

Como se observa en el Cuadro 19, Figuras 18 y 19 en los valores de pH se observó una triple interacción ($P < 0.0001$) entre tamaño de partícula x nivel de humedad x tiempo de almacenaje, en donde el pH promedio para el d 0 en entero y quebrado fue de 6.24 y disminuyó (29.6%, $P < 0.0001$) a 4.39 y 4.24 (32.05%, $P < 0.0001$) para los días 21 y 42 respectivamente. No se observó diferencia ($P > 0.05$) entre 21 y 42 d; excepto para grano entero a 25% de humedad en donde a 42d disminuyó (16.5%, $P < 0.0001$). Para el día 0 se observó que el valor de pH fue mayor (5.46%, $P < 0.0001$) en entero respecto a quebrado con 35% y 25% de humedad. Respecto al % de humedad en entero y quebrado fue mayor (9.35%, $P < 0.0001$) para 25% respecto a 30 y 35%, no se observaron diferencias ($P > 0.05$) entre 30 y 35% de humedad, excepto para entero con 21d en donde disminuyó ($P < 0.0001$) el valor de pH en 12.4% y 19.31% para 30 y 35% de humedad respectivamente. Lo cual concuerda con Huck, *et al.*³⁴, Helm, *et al.*⁴⁰ y Stock, *et al.*⁷¹ quienes observaron que al aumentar el tiempo de almacenaje y % de humedad disminuye el valor de pH. Estos resultados concuerdan con Goerign, *et al.*⁷², Bechtel *et al.*⁷³, Hill, *et al.*⁷⁴, Roffler, *et al.*⁷⁵, quienes señalan que al disminuir de 30% la humedad no se lleva a cabo un adecuado proceso de fermentación. El tiempo de almacenaje no afectó el pH, lo cual concuerda con lo que reporta Huck, *et al.*³⁴, quienes encontraron que después de 21 días el proceso se estabiliza, sin embargo señalan un valor de pH de 6.6 a 5.2 con 25% de humedad del día 10 al 90.

Cuadro 19. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en la concentración de pH

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	6.34 ^{ab}	0.005	4	4.92 ^c	0.12	4	4.11 ^{de}	0.045
	30	4	6.30 ^{ab}	0.005	4	4.31 ^d	0.055	4	4.11 ^{de}	0.045
	35	4	6.41^a	0.02	4	3.97^e	0.025	4	4.17 ^{de}	0.04
Quebrado	25	4	6.06 ^b	0.015	4	4.65 ^c	0.14	4	4.72 ^c	0.045
	30	4	6.17^{ab}	0.005	4	4.28 ^d	0.055	4	4.25 ^{de}	0.025
	35	4	6.16 ^{ab}	0.005	4	4.21 ^{de}	0.06	4	4.06^{de}	0.01

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Diferente literal entre hileras y columnas son diferentes.

Interacción entre tamaño de partícula x % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

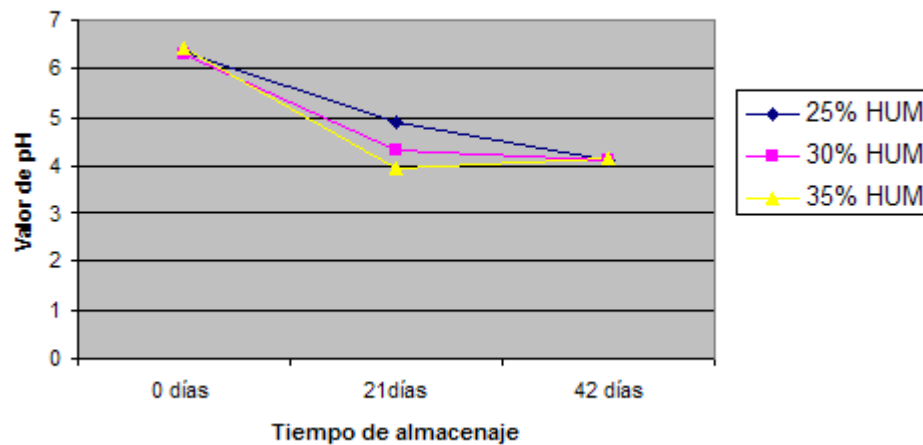


Figura 18. Efecto del tiempo de almacenaje sobre la concentración de pH en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

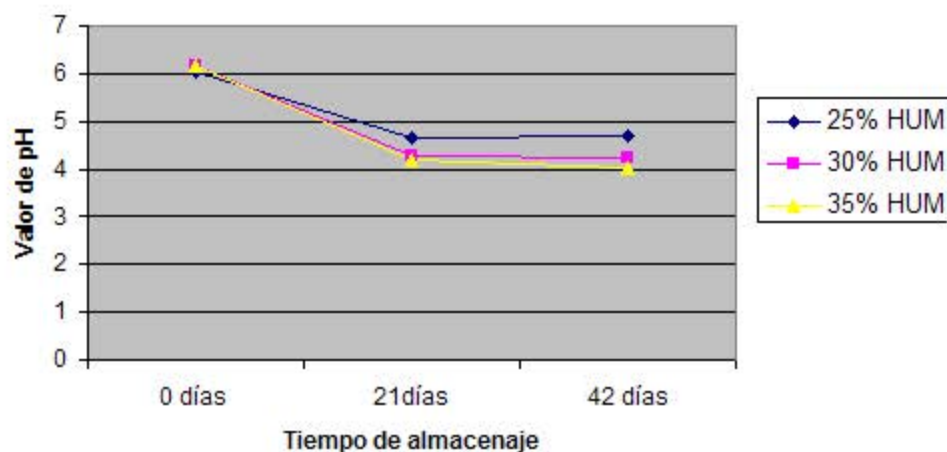


Figura 19. Efecto del tiempo de almacenaje sobre la concentración de pH en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.3.4. Porcentaje de ácido acético

Como se observa en el Cuadro 20, Figuras 20 y 21, al incrementarse el porcentaje de humedad se incrementa la concentración de ácido acético en grano entero y quebrado para 21d y 42d (interacción % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0287$). Sin embargo son mayores (26.88%, interacción % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0287$) los valores de 42d respecto a 21d. Y son mayores (18.71%, interacción tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0316$), los valores para grano entero con 35% de humedad, respecto a grano quebrado. Lo cual concuerda con Huck, *et al.*³⁴ (0.1 - 0.4) quienes concluyen que a mayor porcentaje de humedad y tiempo de almacenaje aumenta la concentración de ácido acético (29.32 y 66.15%, $P < 0.0287$) para 30 y 35% respecto a 25% de humedad. Aunque los valores encontrados de ácido acético por Helm, *et al.*⁴⁰ (0.37 - 0.67) y; Stock, *et al.*⁷¹ (0.2 - 0.5) son mayores a los encontrados en el presente estudio.

Cuadro 20. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido acético

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.035	0.003	4	0.082	0.019	4	0.105	0.024
	30	4	0.010	0.004	4	0.095	0.024	4	0.130	0.015
	35	4	0.020	0.007	4	0.102	0.013	4	0.120	0.019
Quebrado	25	4	0.040	0.004	4	0.027	0.013	4	0.052	0.005
	30	4	0.047	0.006	4	0.052	0.005	4	0.067	0.011
	35	4	0.010	0.020	4	0.120	0.004	4	0.100	0.020

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0316$

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0002$

Interacción entre las variables % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0287$

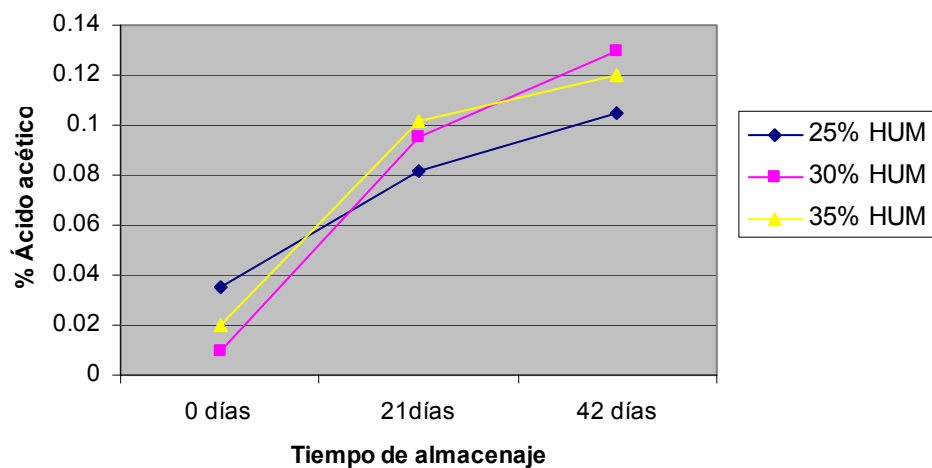


Figura 20. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido acético en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

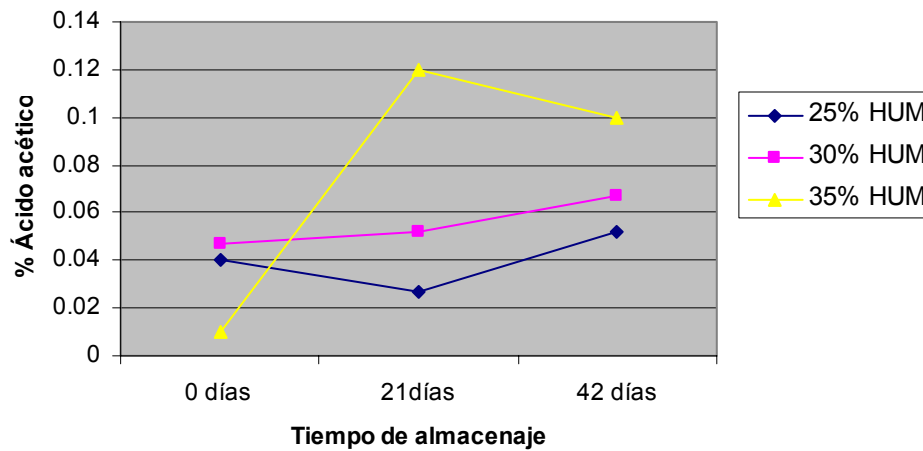


Figura 21. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido acético en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.5. Porcentaje de ácido propiónico

Como se observa en el Cuadro 21, Figuras 22 y 23, en los valores de ácido propiónico existe una triple interacción entre tamaño de partícula x nivel de humedad x tiempo de almacenaje ($P < 0.0002$). En donde con grano quebrado a 30% de humedad, se encontraron los mayores valores (0.092 y 0.117) para 21 y 42d respectivamente de almacenamiento respecto a 0d. En donde se incrementó la concentración (27.17%, $P < 0.0002$) a 42d respecto a 21d. Se observa que al incrementar el tiempo de almacenaje, se incrementa la concentración del ácido propiónico. Estos valores se encuentran por debajo de lo reportado por Helm, *et al.*⁴⁰(0.17-0.48).

Cuadro 21. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido propiónico

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.000 ^b	0.000	4	0.025 ^b	0.015	4	0.035 ^b	0.010
	30	4	0.000 ^b	0.000	4	0.002 ^b	0.003	4	0.015 ^b	0.005
	35	4	0.000 ^b	0.000	4	0.002 ^b	0.003	4	0.025 ^b	0.003
Quebrado	25	4	0.000 ^b	0.000	4	0.032 ^b	0.026	4	0.037 ^b	0.006
	30	4	0.010 ^b	0.000	4	0.092^a	0.009	4	0.117^a	0.013
	35	4	0.005 ^b	0.003	4	0.027 ^b	0.003	4	0.007 ^b	0.003

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Diferente literal entre hileras y columnas son diferentes.

Interacción entre tamaño de partícula x % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0002$

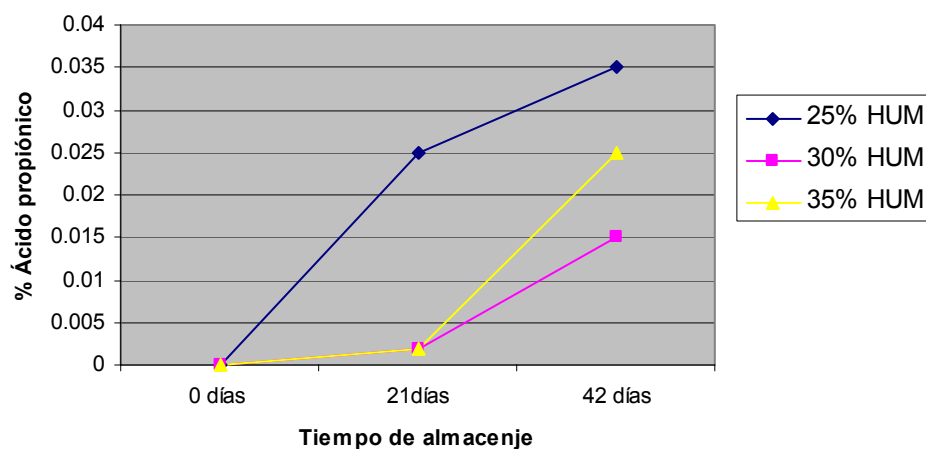


Figura 22. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido propiónico en grano de

sorgo entero reconstituido y ensilado.

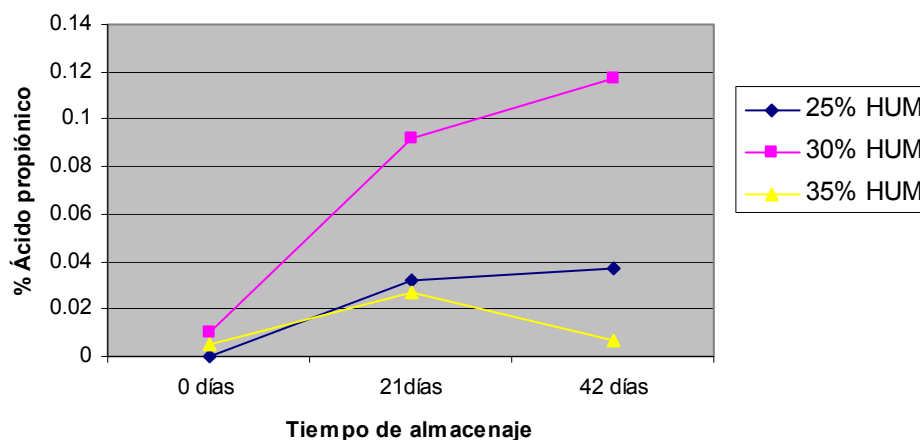


Figura 23. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido propiónico en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.6. Porcentaje de ácido butírico

Como se muestra en el Cuadro 22 y Figuras 24 y 25, se observó una interacción ($P < 0.0016$) % de humedad y tiempo de almacenaje, en donde al incrementar el nivel de humedad se incrementa la concentración de ácido butírico (29.6 y 61.2%, $P < 0.0016$) para 30 y 35 respecto a 25% de humedad. Sin embargo son mayores (3.63%) los valores de 21d respecto a 42d. Y son mayores (61.20%, interacción tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0007$), en grano quebrado con 30% de humedad, con respecto al grano entero con similar humedad. Estos valores coinciden por lo reportado por Helm, *et al.*⁴⁰ (0.08-0.13). Las concentraciones de ácido butírico en las muestras nos dan una idea de como se llevó a cabo el proceso de fermentación, aquí se busca tener mínimas concentraciones de flora butírica, ya que descompone los aminoácidos en amoníaco, anhídrido carbónico, ácidos grasos volátiles y en ciertos compuestos nitrogenados como las aminas,

que pueden ser tóxicas. Se observa que su comportamiento se mantiene constante durante el tiempo de almacenaje y que los menores valores (41.48%, interacción tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0378$) los encontramos en grano entero, respecto a quebrado, donde son mayores las concentraciones de este ácido.

Cuadro 22. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido butírico

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.000	0.000	4	0.167	0.078	4	0.165	0.038
	30	4	0.000	0.000	4	0.147	0.031	4	0.137	0.019
	35	4	0.000	0.000	4	0.087	0.017	4	0.075	0.012
Quebrado	25	4	0.000	0.000	4	0.250	0.090	4	0.202	0.017
	30	4	0.002	0.003	4	0.347	0.035	4	0.385	0.022
	35	4	0.005	0.003	4	0.075	0.032	4	0.070	0.017

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0007$

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0378$

Interacción entre las variables % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0016$

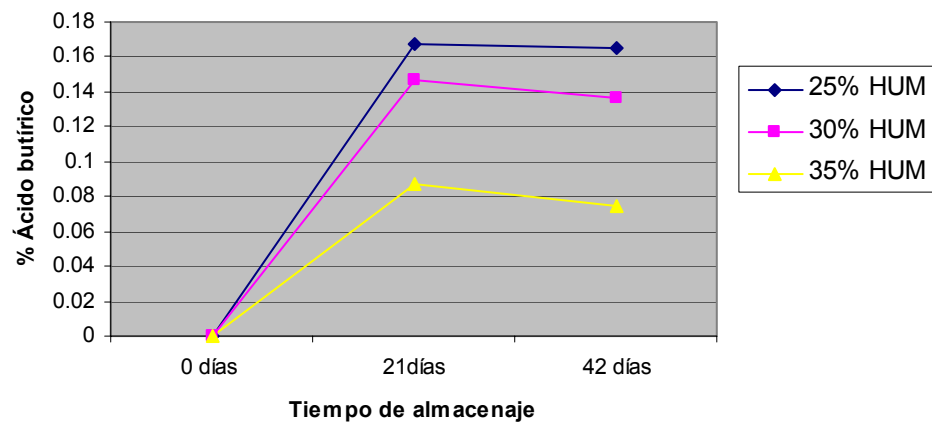


Figura 24. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido butírico en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

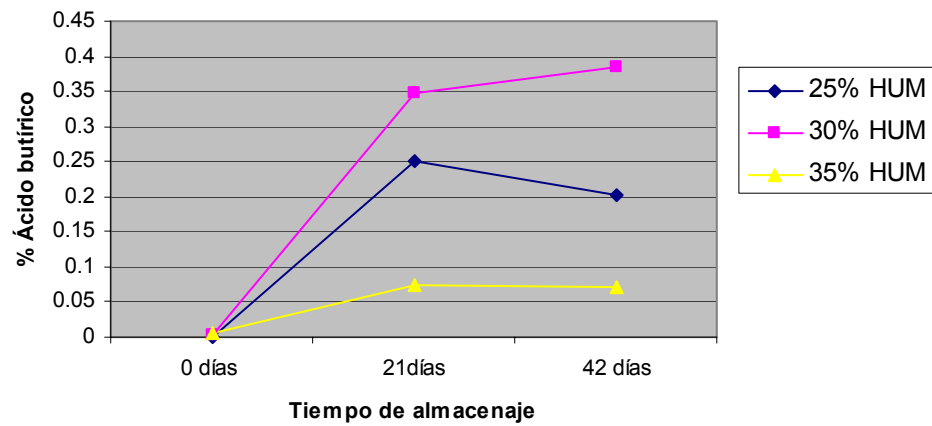


Figura 25. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido butírico en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.7. Porcentaje de ácido láctico

Como se observa en el Cuadro 23 y Figuras 26 y 27, en los valores de ácido láctico se encontró una triple interacción ($P < 0.0001$) entre tamaño de partícula x nivel de humedad x tiempo de almacenaje, respecto a 0d la concentración de ácido láctico se incrementó 165 y 153% en grano entero, 178 y 189% para quebrado a 21 y 42d respectivamente. No se encontraron diferencias ($P > 0.05$) entre 21 y 42d, excepto para quebrado con 30% de humedad que presentó un incremento (43.5%, $P < 0.01$) en 42d respecto a 21d. Lo cual concuerda con Huck, *et al.*³⁴(0.4 – 1.5%), Helm, *et al.*⁴⁰ (0.4 – 1.0%) y Stock, *et al.*⁷¹ (1.06 – 1.78%), quienes observaron que al aumentar el tiempo de almacenaje y % de humedad disminuye el valor de pH y se incrementa la concentración de ácido láctico.

Cuadro 23. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de ácido láctico

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.000 ^e	0.000	4	0.567 ^{cd}	0.106	4	0.570 ^{cd}	0.101
	30	4	0.000 ^e	0.000	4	0.757^{bcd}	0.033	4	0.485^d	0.019
	35	4	0.000 ^e	0.000	4	0.630 ^{cd}	0.019	4	0.530 ^{cd}	0.022
Quebrado	25	4	0.000 ^e	0.000	4	0.537^{cd}	0.075	4	0.542 ^{cd}	0.038
	30	4	0.000 ^e	0.000	4	0.770 ^{bc}	0.082	4	1.105^a	0.020
	35	4	0.000 ^e	0.000	4	1.027 ^{ab}	0.090	4	1.015 ^{ab}	0.069

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Diferente literal entre hileras y columnas son diferentes.

Interacción entre tamaño de partícula x % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

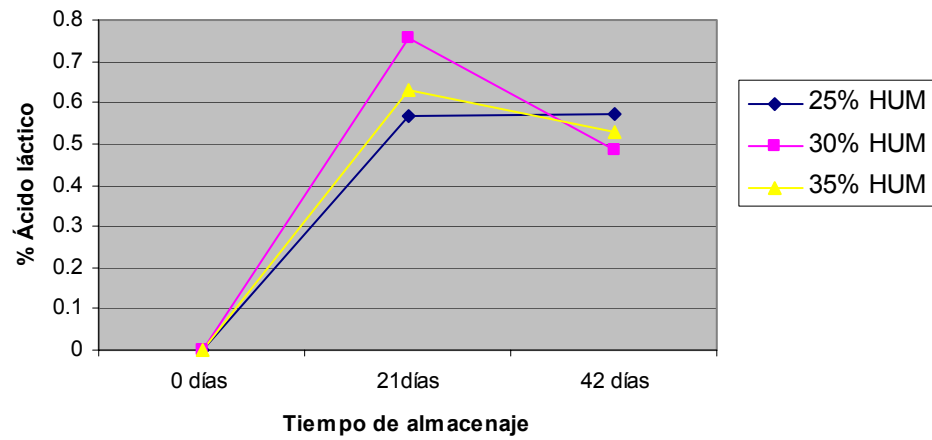


Figura 26. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido láctico en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

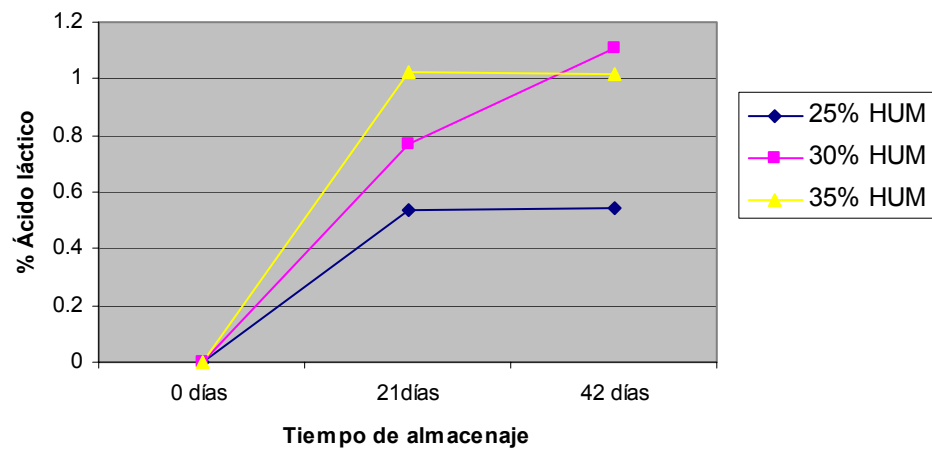


Figura 27. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de ácido láctico en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.8. Porcentaje de la relación ácido propiónico:ácido acético (P:A)

Como se observa en el Cuadro 24, Figuras 28 y 29 la relación P:A, con el nivel de 30% de humedad para grano quebrado en 21d y 42d, fue mayor (95.73%, interacción tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0223$) respecto a grano entero para 21 y 42d. Se observó una mayor relación P:A para 21 respecto a 42d (44.34%, interacción % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0444$) para los niveles de 25% de humedad en grano entero y 35% de humedad en grano entero y quebrado respectivamente. La literatura señala que la relación propionato:acetato tiende a incrementarse a medida que el contenido de la fibra aumenta. Los principales factores que afectan el tipo de fermentación durante el ensilaje son: a) contenido de humedad, b) capacidad amortiguadora de la masa, c) disponibilidad de glúcidos solubles en agua, d) tipo de bacterias predominantes y e) velocidad de la fermentación. Tejada, *et al.* ⁷⁶

Cuadro 24. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de la relación P:A

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.000	0.000	4	0.539	0.808	4	0.440	0.391
	30	4	0.000	0.000	4	0.037	0.029	4	0.117	0.081
	35	4	0.000	0.000	4	0.036	0.009	4	0.172	0.029
Quebrado	25	4	0.105	0.019	4	1.458	1.350	4	0.720	0.054
	30	4	0.182	0.031	4	1.750	0.041	4	1.860	0.208
	35	4	0.118	0.068	4	0.230	0.028	4	0.080	0.033

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0223$

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0234$

Interacción entre las variables % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0444$

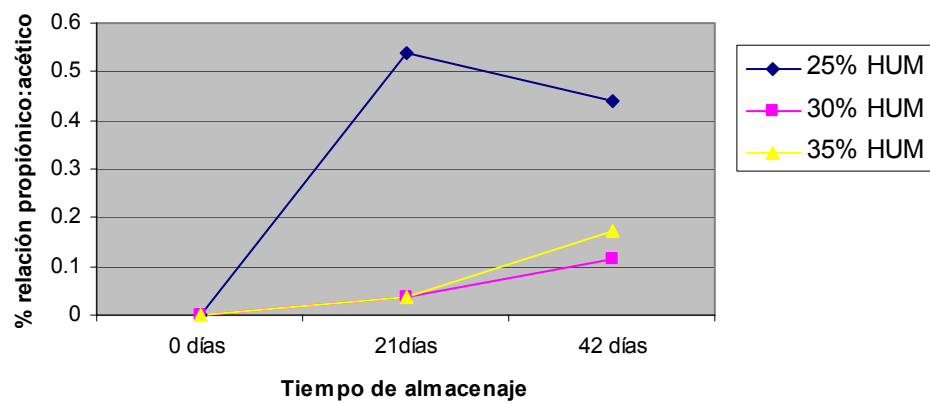


Figura 28. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje en la relación ácido P:A en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

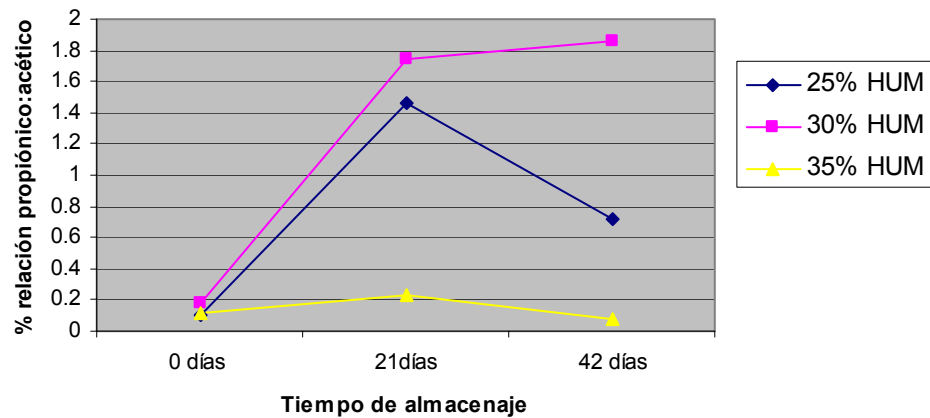


Figura 29. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje en la relación ácido P:A en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.9. Porcentaje de la relación ácido láctico:ácido acético (L:A)

Como se observa en el Cuadro 25, Figuras 30 y 31 en la relación L:A, no se encontró diferencia ($P > 0.05$) entre los diferentes tratamientos. Estos resultados nos muestran la eficiencia en la fase de fermentación. Los materiales presentes en el material por ensilar, van a ser fermentados a través de las rutas metabólicas: homoláctica y heteroláctica. En la primera, por cada molécula de glucosa, se produce únicamente lactato y en la heteroláctica se produce lactato, además de etanol y CO_2 . En la fermentación homoláctica se tiene una recuperación del 100% de la materia seca y el 99.3% de la energía; en la heteroláctica la recuperación de la materia seca es de solamente 76% y de la energía del 98.3% (Tejada, *et al.* ⁷⁶). Estos resultados concuerdan con lo reportado por Huck, *et al.* ³⁴ quienes señalan que una alta concentración de lactato, mayor a 6.2% indica una fermentación homoláctica y una baja concentración (3.5 a 6.1%) una fermentación heteroláctica. Los valores encontrados en este estudio oscilan entre (9.99%) para 21d y (9.37%) para 42 d.

Cuadro 25. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de la relación L:A

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.000	0.000	4	7.964	1.998	4	5.570	0.810
	30	4	0.000	0.000	4	10.187	2.740	4	3.947	0.549
	35	4	0.000	0.000	4	6.317	0.602	4	4.673	0.693
Quebrado	25	4	0.000	0.000	4	11.583	4.088	4	11.367	1.991
	30	4	0.000	0.000	4	15.323	1.652	4	18.114	2.795
	35	4	0.000	0.000	4	8.556	0.478	4	12.536	3.752

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

No se encontró diferencia estadística entre los diferentes tratamientos $P > 0.05\%$

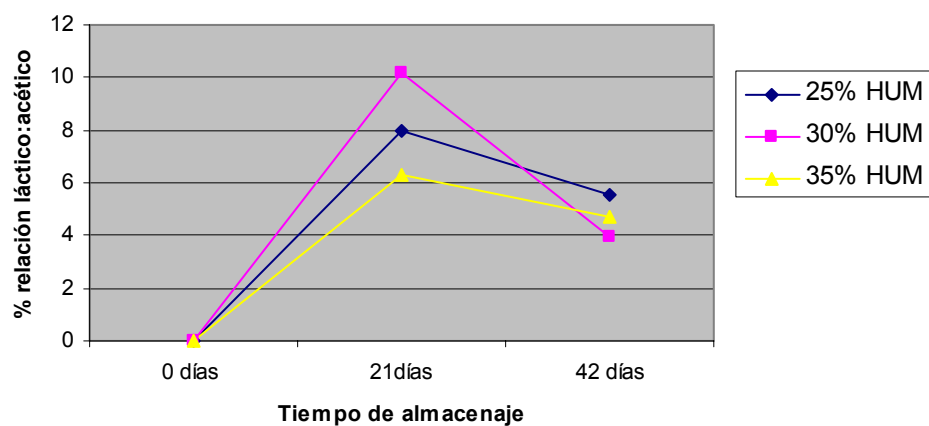


Figura 30. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje en la relación ácido L:A en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

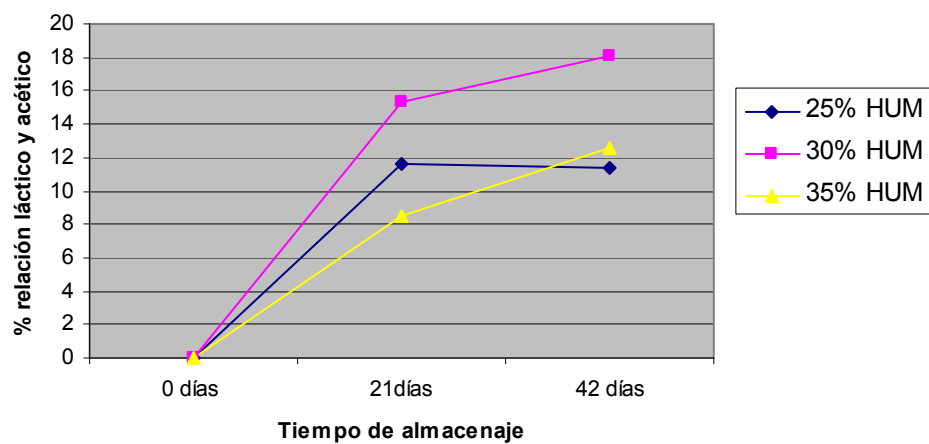


Figura 31. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje en la relación ácido L:A en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.10. Porcentaje de nitrógeno total (NT)

Como se observa en el Cuadro 26, Figuras 32 y 33. En grano entero al incrementarse el porcentaje de humedad disminuye la concentración de nitrógeno total de 25 a 30% de humedad (3.6%, interacción tamaño de partícula x porcentaje de humedad, $P < 0.0136$). Para grano de sorgo quebrado hay una disminución en la concentración de nitrógeno total, al incrementarse el nivel de humedad en (7.83 y 11.30% interacción tamaño de partícula x porcentaje de humedad, $P < 0.0136$) para 30 y 35% de humedad respecto a 25%. En grano entero de sorgo la concentración de nitrógeno total disminuyó (8.67 y 12.7%, interacción tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$) para 21 y 42d respecto a 0d. En grano quebrado de sorgo la concentración de nitrógeno total disminuyó (1.186 y 3.28%, interacción tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$) para 21 y 42d respecto a 0d. Estos valores se encuentran dentro de los rangos que reportan por Phillip, *et al.*⁷⁷ (1.49 -1.73) para ensilados de grano de maíz y Bergen, *et al.*⁷⁸ quienes trabajaron con ensilados de planta entera de maíz (1.34-1.42). Los valores encontrados en este estudio se encuentran por debajo de lo reportado por Zinn,⁷⁹ quién encuentra valores de (1.53 para grano de maíz y de 1.65 para grano de sorgo). Un estudio realizado por Xiong, *et al.*⁸⁰ concluye que el proceso de reconstitución y ensilaje incrementa la degradación de proteína, esto debido a que con un mayor tiempo de almacenaje se solubiliza la matriz proteica, haciendo más disponible la penetración de las enzimas hacia los gránulos de almidón envueltos en dicha matriz.

Cuadro 26. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de nitrógeno total

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	1.16	0.025	4	1.13	0.026	4	1.04	0.010
		4	1.17	0.038	4	1.03	0.011	4	1.01	0.004
	35	4	1.13	0.026	4	1.00	0.006	4	0.97	0.011
		4	1.16	0.013	4	1.15	0.006	4	1.14	0.013
Quebrado	25	4	1.09	0.006	4	1.08	0.000	4	1.03	0.000
		4	1.04	0.011	4	1.02	0.009	4	1.01	0.006
	30	4	1.09	0.006	4	1.08	0.000	4	1.03	0.000
		4	1.04	0.011	4	1.02	0.009	4	1.01	0.006

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0136$

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

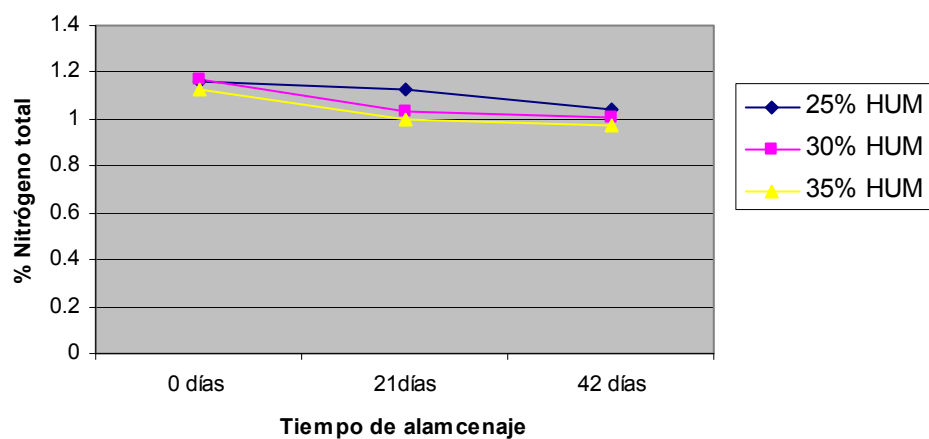


Figura 32. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de nitrógeno total en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

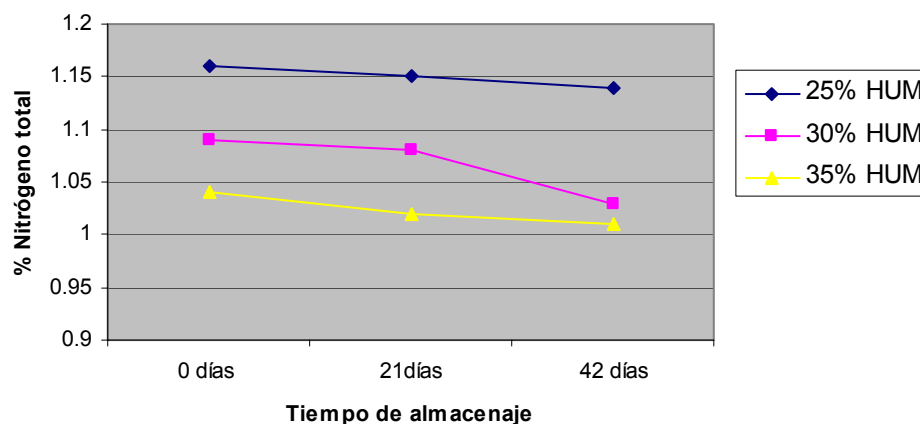


Figura 33. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de nitrógeno total en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.11. Porcentaje de nitrógeno amoniacal (N-NH₃)

Como se observa en el Cuadro 27, Figuras 34 y 35, en los valores de N-NH₃ se encontró una interacción ($P < 0.0001$) entre tamaño de partícula x nivel de humedad x tiempo de almacenaje. Para grano entero la concentración de N-NH₃ se incrementó (71.09 y 83.95%, $P < 0.0001$) y para grano quebrado también incrementó (75.61 y 82.93%, $P < 0.0001$) para 21 y 42d respecto a 0d. Al aumentar el tiempo de almacenaje y porcentaje de humedad incrementa la concentración de N-NH₃. Estos valores concuerdan con lo reportado por Huck, *et al.*³⁴ (0.05 - 0.6) quienes describen que nunca alcanzaron valores mayores de 1%. Phillip, *et al.*⁷⁷ (0.08 -1.0 N-NH₃.) para ensilados de maíz y Bergen, *et al.*⁷⁸ (0.02- 0.55 N-NH₃.) quienes trabajaron con ensilados de planta entera de maíz. Sin embargo no concuerdan con lo reportado por Stock, *et al.*⁷¹ (0.08 –1.6 N-NH₃.). La concentración de N-NH₃ en ensilados, está en función de la tasa de liberación y utilización por los microorganismos.^{77,78}

Cuadro 27. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de nitrógeno amoniacal

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	0.010 ^e	0.000	4	0.030 ^c	0.004	4	0.062 ^a	0.003
	30	4	0.010 ^e	0.000	4	0.037 ^{bc}	0.003	4	0.065^a	0.003
	35	4	0.010 ^e	0.000	4	0.037 ^{bc}	0.003	4	0.060 ^a	0.004
Quebrado	25	4	0.010 ^e	0.000	4	0.037 ^{bc}	0.003	4	0.047 ^b	0.003
	30	4	0.010 ^e	0.000	4	0.040 ^{bc}	0.000	4	0.067^a	0.003
	35	4	0.010 ^e	0.000	4	0.045 ^b	0.003	4	0.062 ^a	0.003

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Diferente literal entre hileras y columnas son diferentes.

Interacción entre tamaño de partícula x % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

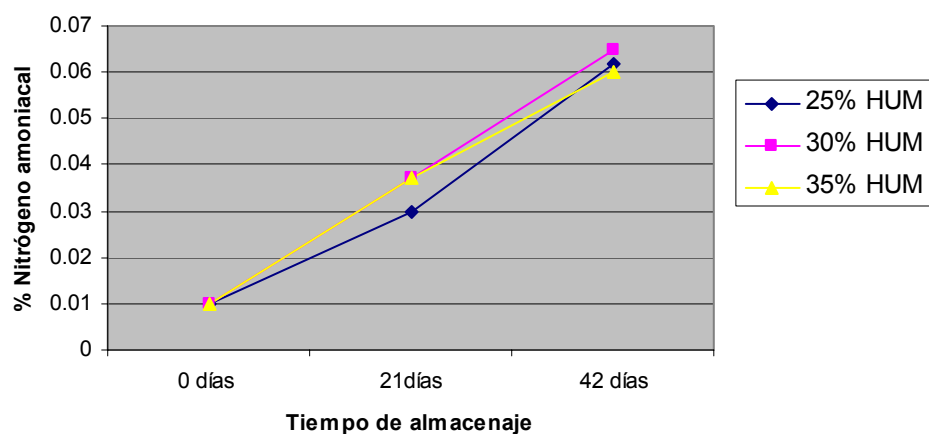


Figura 34. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de nitrógeno amoniacal en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

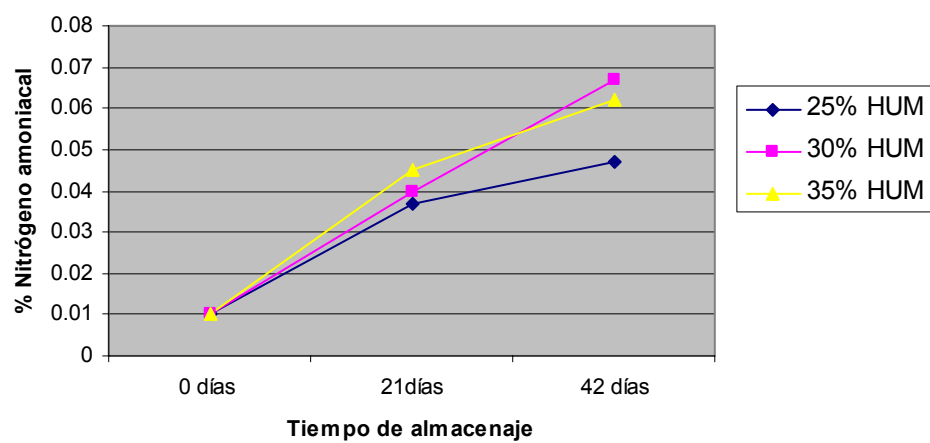


Figura 35. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de nitrógeno amoniacal en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.12. Porcentaje de almidón total

El valor promedio de almidón total para este híbrido de sorgo fue de 72.51%. Como lo muestra el Cuadro 28, Figuras 36 y 37, para grano entero sin considerar el d0, la concentración de almidón total se incrementa (1%) y disminuyó (5.30%, $P < 0.0047$, interacción tamaño de partícula x % de humedad) para 30 y 35% respecto a 25% de humedad. Para grano quebrado disminuyó la concentración del almidón total (0.62 y 1.86%, $P < 0.0047$, interacción tamaño de partícula x % de humedad) para 30 y 35% respecto a 25% de humedad. Para grano entero la concentración del almidón total, se incrementó (0.39%) y disminuyó (11.67%, $P < 0.0001$) interacción tamaño de partícula x % de humedad para 21 y 42d respecto a 0d. Para grano quebrado la concentración del almidón total, se incrementó (0.13 y 1.32%, $P < 0.0001$) interacción tamaño de partícula x % de humedad para 21 y 42d respecto a 0d. Lo cual indica que existieron modificaciones en la composición del grano almacenado por la utilización de proteína por los microorganismos durante el proceso de ensilaje Stock, *et al.*⁷¹ lo cual se confirma con los menores valores de nitrógeno total encontrados en los ensilados. Comparándolo con lo reportado en la literatura observamos que este híbrido posee un alto porcentaje de almidón y se encuentra dentro de los parámetros con diversos autores. Hibberd, *et al.*³³ obtuvo valores para grano de sorgo rolado en seco variedad de grano amarilla 68.4%, variedad de grano roja 70.8%, variedad de grano café 65.0%. Y para el grano de sorgo reconstituido variedad roja 72.9% y para variedad café 65.7%. Stock, *et al.*⁷¹ reportan valores (65.7-69.7%) que se encuentran por debajo de lo estimado en este estudio. Zinn,⁷⁹ encontró valores de 70-71.1% muy similares a los obtenidos en este estudio. Los valores del almidón dependen del híbrido como lo reporta Corona, *et al.*⁸¹ en un estudio realizado con 4 diferentes híbridos de grano de maíz amarillo rolado en seco con diferentes proporciones de endospermo duro:blando, en donde observó los siguientes porcentajes de almidón: A 73.1%, B 73.2%, C 73.6%, D 71.4%. Zinn, *et al.* 2002⁸² reportan

valores de almidón en diferentes cereales maíz 72.1%, trigo 67.9%, cebada 61.3% y sorgo 69.6%, que se encuentra debajo de lo encontrado en el presente estudio.

Cuadro 28. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón total

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	72.82	1.658	4	70.89	0.821	4	65.96	1.736
	30	4	72.79	0.844	4	74.01	0.928	4	64.23	0.347
	35	4	68.80	0.224	4	70.37	0.734	4	59.22	0.814
Quebrado	25	4	72.95	0.673	4	74.03	0.342	4	75.36	0.659
	30	4	74.21	1.256	4	74.79	0.608	4	73.70	0.592
	35	4	73.49	0.491	4	72.12	1.427	4	74.51	0.796

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x % de humedad, $P < 0.0047$

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

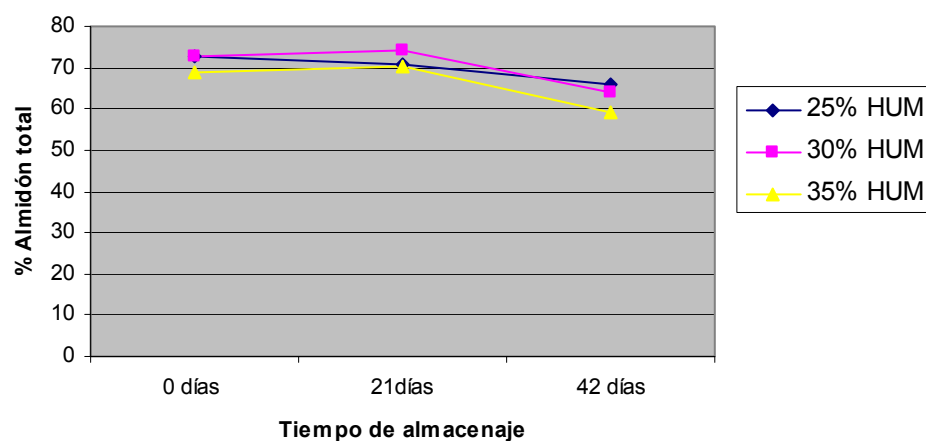


Figura 36. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón total en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

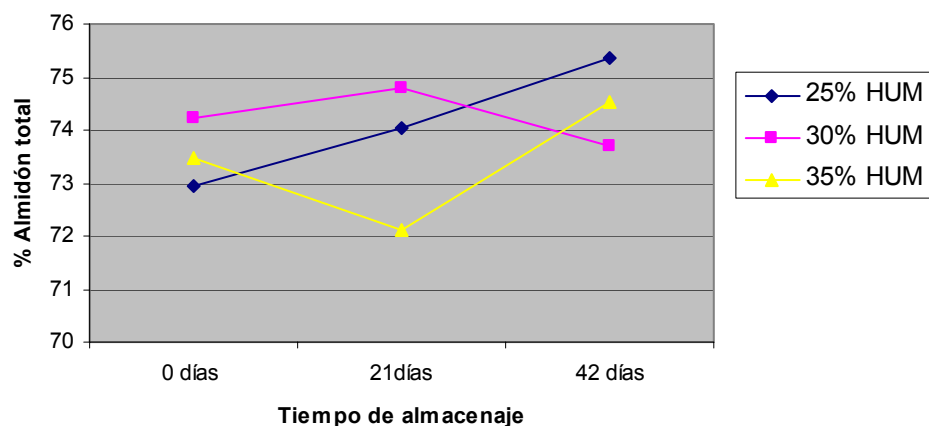


Figura 37. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón total en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.13. Porcentaje de almidón soluble (reactividad del almidón)

Como se observa en el Cuadro 29 y Figuras 38, 39, se encontró una triple interacción ($P < 0.0001$) tamaño de partícula x porcentaje de humedad x tiempo de almacenaje. La concentración de almidón soluble es mayor en grano quebrado (29.44%) respecto a grano entero, excepto para 35% de humedad en 21 y 42d con grano quebrado. Lo cual indica que el proceso de quebrado *per se* incrementa la solubilidad del almidón. Para grano entero no se observó diferencia ($P > 0.05$) en la concentración de almidón soluble en los diferentes niveles de humedad y días de almacenaje. Sin embargo para grano quebrado en el día 42 respecto a 0d, disminuyó la concentración (17.06, 20.55 y 38.24%) para 25, 30 y 35% de humedad respectivamente. Para 21d respecto a 0d, con el nivel de 35% de humedad, la concentración de almidón insoluble disminuyó (27.08%). Trabajos previos de Rodríguez, *et al.*⁵² resaltan la ventaja de combinar las medidas de

reactividad enzimática del almidón soluble para predecir la digestión ruminal del almidón, en donde reporta valores de 9.1% de almidón soluble con grano de sorgo rolando en seco, lo cual coincide con los valores de grano quebrado (8.95%) a 0d. Sin embargo los valores que obtuvimos son menores (30.9 y 18%) para grano entero y quebrado ensilados respectivamente.

Cuadro 29. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón soluble

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	5.96 ^{fg}	0.162	4	5.86 ^{fg}	0.266	4	6.56 ^{efg}	0.038
	30	4	5.73 ^g	0.130	4	6.29 ^{efg}	0.088	4	6.27 ^{efg}	0.076
	35	4	5.97 ^{fg}	0.041	4	6.13 ^{efg}	0.133	4	6.02 ^{fg}	0.210
Quebrado	25	4	8.91 ^a	0.315	4	9.31 ^a	0.089	4	7.39 ^{cd}	0.138
	30	4	8.71 ^{ab}	0.270	4	7.98 ^{bc}	0.260	4	6.92 ^{de}	0.071
	35	4	9.23 ^a	0.154	4	6.73 ^{def}	0.169	4	5.70 ^g	0.052

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Diferente literal entre hileras y columnas son diferentes.

Interacción entre tamaño de partícula x % de humedad x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

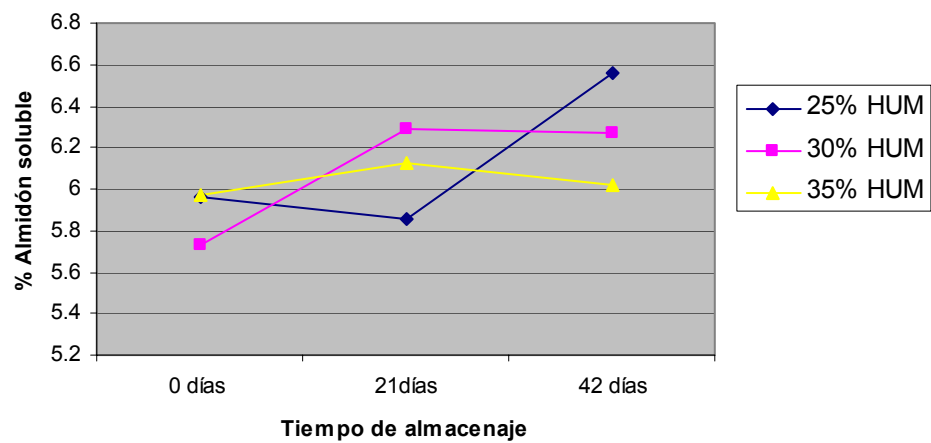


Figura 38. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón soluble en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

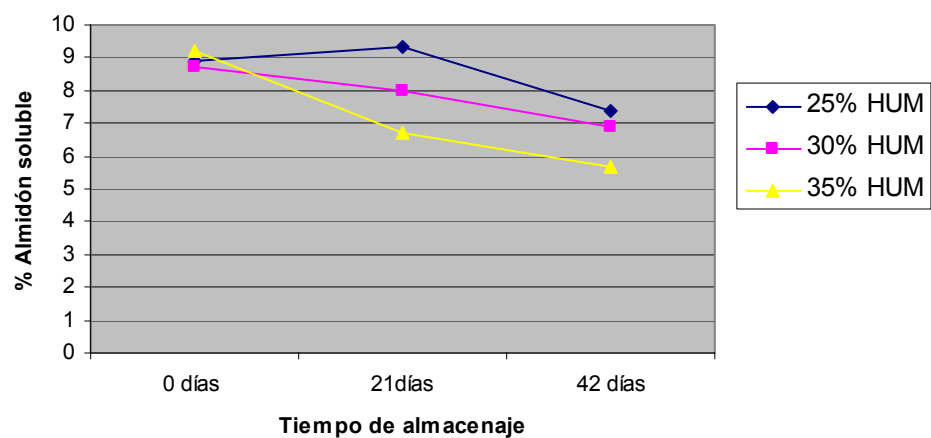


Figura 39. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón soluble en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2. 14. Porcentaje de almidón insoluble

Como se observa en el Cuadro 30, Figuras 40 y 41, se encontró una interacción ($P < 0.0001$) tamaño de partícula x tiempo de almacenaje. La concentración de almidón insoluble es mayor en grano quebrado (8.49%) respecto a grano entero. Para grano entero no se observó diferencia ($P > 0.05$) en la concentración de almidón insoluble en los diferentes niveles de humedad y días de almacenaje. Excepto para 35% de humedad con 42d, donde aumentó (5.57%) con respecto a 0d. Sin embargo para grano quebrado aumentó la concentración de almidón insoluble (24.25%) y (24%) para 21 y 42d respecto a 0d. Estos valores discrepan de los encontrados por Rodríguez, *et al.*⁵² quienes reportan en grano de maíz rolado en seco (61.1%), maíz hojueleado al vapor (60.45%). Para grano de sorgo rolado en seco (64.7%), sorgo hojueleado al vapor (56.65%). La fracción del almidón insoluble consiste en la fracción del almidón que esta envuelto en la matriz proteica y que se hace susceptible a la amiloglucosidasa y demás enzimas que degradan al grano.

Cuadro 30. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de almidón insoluble

TAMAÑO DE PARTÍCULA	%	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	41.61	0.331	4	39.63	0.689	4	40.80	0.411
	30	4	40.93	0.486	4	39.64	1.775	4	40.53	0.708
	35	4	38.28	0.581	4	37.01	0.589	4	40.54	1.089
Quebrado	25	4	35.73	1.617	4	46.27	0.480	4	47.03	0.926
	30	4	36.29	0.738	4	49.64	0.644	4	48.09	0.887
	35	4	35.86	0.552	4	46.50	0.899	4	46.85	0.512

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

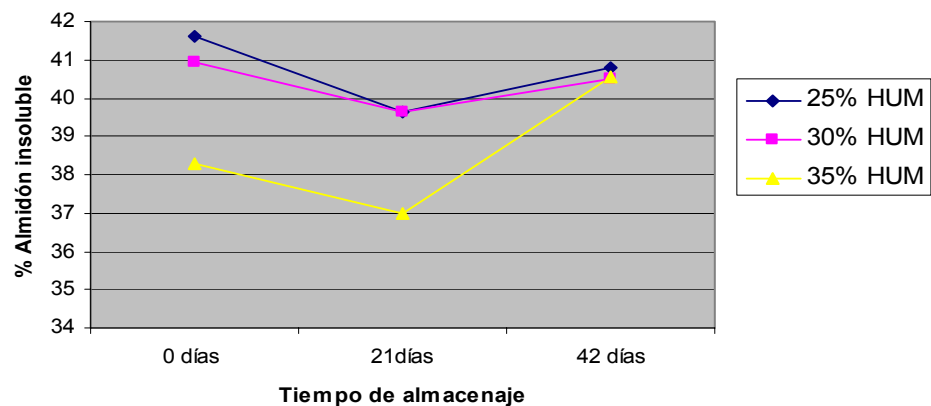


Figura 40. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón insoluble.

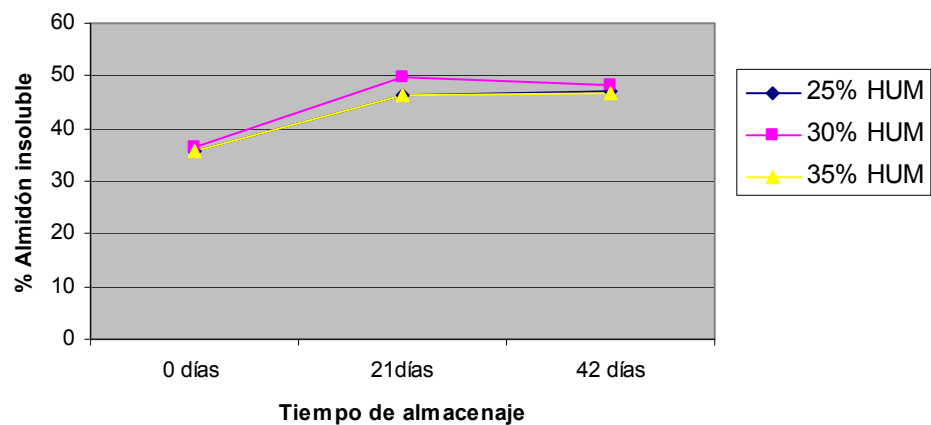


Figura 41. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de almidón insoluble en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

3.2.15. Porcentaje de digestibilidad ruminal *in vitro* del almidón del grano de sorgo reconstituido y ensilado

Como lo muestra el Cuadro 31, Figuras 42 y 43. Se encontró una interacción ($P < 0.0001$) tamaño de partícula x tiempo de almacenaje. En el grano entero se obtuvieron valores de 63.43, 62.45 y 67.11% para 0d, 21d y 42d respectivamente. Disminuyó el porcentaje de digestibilidad de 0d a 21d (1.55%, $P < 0.0001$), el de 42d con respecto a 0d, se incrementó (5.80%, $P < 0.0001$). El incremento más notable se dio del 21d a 42d (7.46%, $P < 0.0001$). Para grano quebrado se obtuvieron valores de 60.98, 67.46 y 66.43% para 0d, 21d y 42d respectivamente. Aumentó el porcentaje de digestibilidad notablemente de 0 a 21d (10.63%, $P < 0.0001$), también incrementó de 0d con respecto a 42d (8.94%, $P < 0.0001$). Pero disminuyó de 21d a 42d (1.53%, $P < 0.0001$). Los valores de digestión ruminal promediaron en general (entero y quebrado) 62.21% para 0d, de 64.95% 21d y de 66.77% 42d. Por lo que el proceso de reconstitución y ensilaje incrementó (4.22 y 6.83%, $P < 0.0001$) para 21d y 42d respecto a 0d, la digestibilidad ruminal *in vitro*. Estos valores concuerdan para grano de sorgo reconstituido y ensilado con Owens *et al.*⁸⁵, quién encontró valores de (67.8%) con rolado en seco y (86.2%) para reconstituido y ensilado y con Hibberd *et al.*³³ quienes en promedio para grano de sorgo rolado en seco obtuvieron valores de (68.83%) y con grano reconstituido y ensilado (83.4%), comparando nuestros valores con grano quebrado de 30% de humedad y 21d, disminuyó (0.50 y 1.99%) en rolado en seco y (21.7 y 19.11%) respecto a Owens y Hibberd. Con Rodríguez *et al.* 2001⁵² (72.1%), y Streeter *et al.* 1990⁸⁸ (69.07%), los valores que encontramos (6.43, 2.33%) son menores. Y con Theurer *et al.* 1999⁸⁴ (66.8%), son mayores (1%) con grano rolado en seco. Sin embargo están por debajo de lo reportado por Rodríguez, *et al.*⁵² Corona, *et al.*⁸¹, Zinn, *et al.*⁸², Balogun, *et al.*⁸³ Theurer, *et al.*⁸⁴, Owens, *et al.*⁸⁵, Corona, *et al.*⁶⁶, Zinn, *et al.*⁸⁶, DePeters, *et al.*⁸⁷ en donde se observan mayores los porcentajes de digestión ruminal del almidón, con grano hojueleado al vapor.

Ecuación de Predicción:

Digestibilidad ruminal *in Vitro* = (100 – Almidón soluble) (Almidón insoluble/(Almidón insoluble + 0.05))

Cuadro 31. Efecto del tamaño de partícula, % de humedad, tiempo de almacenaje en el proceso de reconstitución y ensilaje del grano de sorgo en el porcentaje de digestibilidad ruminal *in vitro* del almidón

TAMAÑO DE PARTÍCULA	% HUMEDAD	TIEMPO DE ALMACENAJE								
		0 días			21 días			42 días		
		<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***	<i>n</i> *	<i>X</i> **	<i>EEM</i> ***
Entero	25	4	63.76	0.463	4	63.25	0.376	4	66.22	0.903
	30	4	63.27	0.233	4	62.19	1.247	4	66.58	0.494
	35	4	63.26	0.344	4	61.91	0.572	4	68.53	0.923
Quebrado	25	4	60.99	1.249	4	67.39	0.237	4	66.34	0.376
	30	4	60.91	1.010	4	68.07	0.392	4	67.20	0.337
	35	4	61.06	0.181	4	66.92	0.904	4	65.75	0.235

Donde:

* Número de muestras

** Promedio de muestras

*** Error estándar de la media

Interacción entre las variables tamaño de partícula x tiempo de almacenaje, $P < 0.0001$

En el Cuadro 32 se reportan estudios previos donde se pueden observar diferentes porcentajes de digestibilidades ruminales *in vitro* e *in vivo*, con diferentes cereales y distintos métodos de procesamiento.

Cuadro 32. Estudios previos donde se analizaron diferentes cereales, métodos de procesamiento y obtuvieron el porcentaje de digestibilidad ruminal *in vitro*, e *in vivo*.

<i>Referencia</i>	<i>Grano</i>	<i>Método de procesamiento</i>	<i>% Digestibilidad ruminal in vitro</i>	<i>% Digestibilidad ruminal in vivo</i>
Hibberd <i>et al.</i> 1985	Sorgo rojo	Reconstituido	89.8	
Hibberd <i>et al.</i> 1985	Sorgo café	Reconstituido	77.0	
Owens <i>et al.</i> 1986	Sorgo	Ensilado	86.2	
Hibberd <i>et al.</i> 1985 ³³	Sorgo amarillo	Rolado en seco	71.1	
Hibberd <i>et al.</i> 1985	Sorgo rojo	Rolado en seco	60.2	
Hibberd <i>et al.</i> 1985	Sorgo café	Rolado en seco	75.2	
Owens <i>et al.</i> 1986 ⁸⁵	Sorgo	Rolado en seco	67.8	
Streeter <i>et al.</i> 1990 ⁸⁸	Sorgo amarillo	Rolado en seco	70.7	
Streeter <i>et al.</i> 1990	Sorgo crema	Rolado en seco	73.3	
Streeter <i>et al.</i> 1990	Sorgo hetero-amarillo	Rolado en seco	66.9	95
Streeter <i>et al.</i> 1990	Sorgo rojo	Rolado en seco	65.4	97
Theurer <i>et al.</i> 1999 ⁸⁴	Sorgo	Rolado en seco	66.8	
Rodríguez <i>et al.</i> 2001 ⁵²	Sorgo	Rolado en seco	72.1	
Zinn <i>et al.</i> 1991 ⁷⁹	Sorgo	Hojueleado al vapor	80.3	
Theurer <i>et al.</i> 1999	Sorgo	Hojueleado al vapor	82.5	
Rodríguez <i>et al.</i> 2001	Sorgo	Hojueleado al vapor	82.9	
Zinn <i>et al.</i> 2002 ⁸²	Sorgo	Hojueleado al vapor	80.9	
Altamirano <i>et al.</i> 2004 ⁹⁰	Sorgo	Molido	58.84	
Altamirano <i>et al.</i> 2004	Sorgo	Molido	58.12	
Owens <i>et al.</i> 1986 ⁸⁵	Maíz	Entero	58.9	
Owens <i>et al.</i> 1986	Maíz	Tostado	68.9	
Owens <i>et al.</i> 1986	Maíz	Molido	77.7	
Owens <i>et al.</i> 1986	Maíz	Ensilado	86.0	
Owens <i>et al.</i> 1986	Maíz	Rolado en seco	71.8	
Streeter <i>et al.</i> 1990 ⁸⁸	Maíz	Rolado en seco	85.8	
Rodríguez <i>et al.</i> 2001 ⁵²	Maíz	Rolado en seco	71	
Corona <i>et al.</i> 2006 ⁶⁶	Maíz V55	Rolado en seco	68.46	69.7
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V61	Rolado en seco	67.84	72.8
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V63	Rolado en seco	66.99	73.4
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V65	Rolado en seco	66.68	70.6
DePeters <i>et al.</i> 2007 ⁸⁷	Maíz VT55	Rolado en seco	68.46	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT60	Rolado en seco	67.84	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT63	Rolado en seco	66.99	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT65	Rolado en seco	66.68	
Owens <i>et al.</i> 1986	Maíz	Hojueleado al vapor	82.8	
Zinn <i>et al.</i> 1991 ⁷⁹	Maíz	Hojueleado al vapor	86.5	

Rodríguez <i>et al.</i> 2001	Maíz	Hojueado al vapor	79.9	
Zinn <i>et al.</i> 2002 ⁸²	Maíz	Hojueado al vapor	84.0	
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V55	Hojueado al vapor	84.26	83.5
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V61	Hojueado al vapor	82.65	86.6
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V63	Hojueado al vapor	82.44	80.8
Corona <i>et al.</i> 2006	Maíz V65	Hojueado al vapor	82.26	83.5
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT55	Hojueado al vapor	84.26	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT60	Hojueado al vapor	82.65	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT63	Hojueado al vapor	82.44	
DePeters <i>et al.</i> 2007	Maíz VT65	Hojueado al vapor	82.26	
Zinn <i>et al.</i> 2002 ⁸²	Trigo	Hojueado al vapor	92.8	
Zinn <i>et al.</i> 2002	Cebada	Hojueado al vapor	93.5	

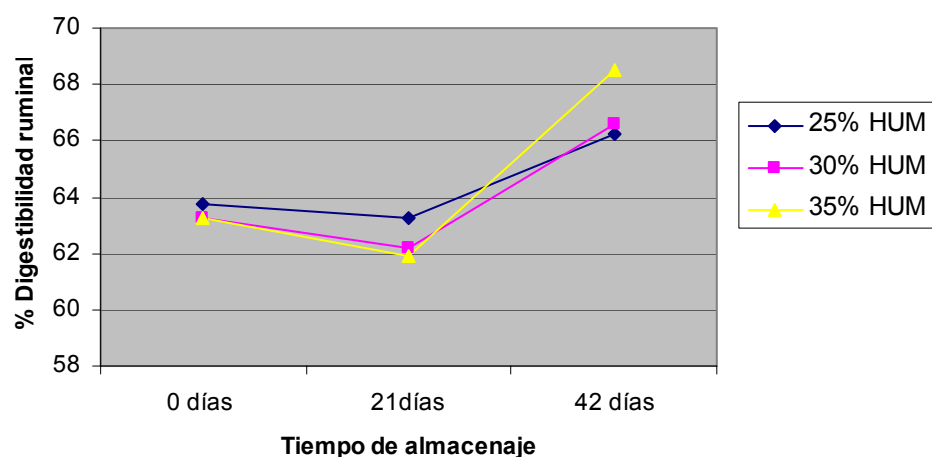


Figura 42. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje digestibilidad ruminal *in vitro* del almidón en grano de sorgo entero reconstituido y ensilado.

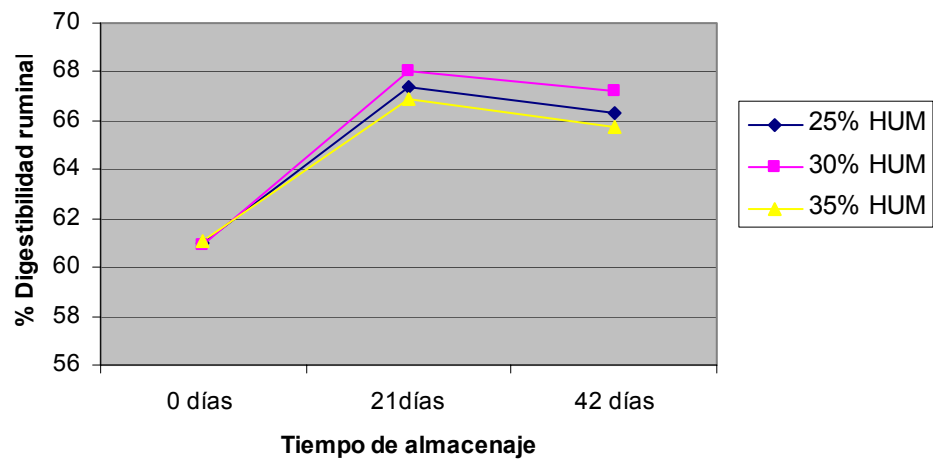


Figura 43. Efecto del tiempo de almacenaje sobre el porcentaje de digestibilidad ruminal *in vitro* del almidón en grano de sorgo quebrado reconstituido y ensilado.

4. CONCLUSIONES

1. Al aumentar el tiempo de almacenaje y porcentaje de humedad disminuye el valor de pH.
2. Al incrementar el porcentaje de humedad y tiempo de almacenaje aumenta la concentración de ácido acético.
3. A mayor porcentaje de humedad y tiempo de almacenaje, la concentración del ácido propiónico se incrementa.
4. Se encontraron mínimas concentraciones de ácido butírico en las muestras analizadas de grano reconstituido y ensilado.
5. Al aumentar el porcentaje de humedad y tiempo de almacenaje se incrementa la concentración de ácido láctico.
6. Al incrementar el nivel de humedad se disminuye el porcentaje de nitrógeno total.
7. Si el tiempo de almacenaje y porcentaje de humedad aumentan, se da un incremento en el porcentaje de nitrógeno amoniacal.
8. Los mayores valores de digestibilidad ruminal *in vitro* del almidón del grano de sorgo reconstituido y ensilado se encontraron para grano de sorgo entero con 35% de humedad almacenado por 42 días y para el grano de sorgo quebrado con 30% de humedad almacenado por 21 días.
9. No se observó crecimiento fungal en los microsilos con grano de sorgo quebrado, en comparación con algunos microsilos con grano entero reconstituido y ensilado.
10. Considerando la digestibilidad del almidón y características de fermentación, las mejores condiciones para realizar el proceso de reconstitución y ensilaje es utilizar grano de sorgo quebrado con 30% de humedad y ensilarlo por 21 días.

11. Para ensilar grano entero se debe permitir un proceso de ensilaje de 42d para obtener digestibilidades similares a las encontradas con grano quebrado a 21d con 30% de humedad.

5. IMPLICACIONES

El proceso de reconstitución y ensilaje en el grano de sorgo incrementa la digestibilidad del almidón respecto al grano entero y quebrado. Por lo que es una alternativa de tratamiento para la alimentación de rumiantes. Se debe realizar un ensilaje de 42d en grano entero para obtener similares digestibilidades con quebrado a 21 días. Sin embargo es necesario realizar pruebas de digestión y comportamiento con animales para confirmar éstos resultados.

6. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados del presente estudio, se recomienda tomar en cuenta lo siguiente:

- 1) Tiempo de reconstitución: es necesario evaluar el grado de absorción y saturación del grano de sorgo, para determinar el tiempo adecuado de reconstitución en grano entero y evaluar algunos agentes surfactantes y/o temperatura del agua, que permitan acelerar este proceso.
- 2) Tiempo de almacenaje: determinar el efecto, sobre la digestibilidad del almidón con tiempos mayor a 42 días.
- 3) Desarrollar el proceso de reconstitución y ensilaje a mayor escala.
- 4) Realizar pruebas de digestión y comportamiento con animales, para poder comprobar que el proceso de reconstitución y ensilaje, aumenta la digestión del almidón *in vivo* y mejora los parámetros productivos.

7. LITERATURA CITADA

1. Caamal CI, Ávila DJA. Situación y perspectivas del sorgo en el contexto del Tratado de Libre Comercio con América del Norte (TLCAN). 2004. Universidad Autónoma Chapingo.
- 2.- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1980-2001. Estadísticas de la Producción Agrícola. Disponible en: www.fao.org
- 3.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. México. 1980 – 2001.
- 4.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). Anuario Estadístico del estado de Tamaulipas. Edición 2001. México. 1980 – 2001.
- 5.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). Anuario Estadístico del estado de Guanajuato. Edición 2001. México. 1980 – 2001.
- 6.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). Anuario Estadístico del estado de Michoacán. Edición 2001. México. 1980 – 2001.
- 7.- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (INEGI). Anuario Estadístico del estado de Sinaloa. Edición 2001. México 1980 – 2001.
- 8.- Pérez OG. "Análisis de la producción y rentabilidad del cultivo del sorgo en DDR 089 Sahuayo, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México. 2003.

- 9.- Secretaría de Agricultura, Ganadería Recursos Pecuarios y Agrícolas (SAGARPA) 2003. Tercer informe de labores. México. Disponible en: www.sagarpa.org.mx
- 10.- Leland RH. El sorgo (Guía para su mejoramiento genético). Universidad Autónoma de Chapingo. 1ra edición. México.1982.
- 11.- Ortega JO, Mendoza OL, Castillo GF. Potencial del germoplasma tolerante al frío en la adaptación y adaptabilidad del sorgo granífero en México: II. Río Bravo, Tamaulipas; y Celaya, Guanajuato. *Agrociencia* 2001; 35: 625-636, México.
- 12.- Calderón SF, Mendoza GD, Hernández GA. Evaluación nutritiva de variedades de sorgo cultivadas en la región de Izúcar de Matamoros Puebla. En *Memorias XXVIII Reunión Anual Asociación Mexicana Producción Animal*. Universidad Autónoma de Chiapas. Tapachula, Chiapas, México. 2000; pp. 191-193.
- 13.- Calles EE. Sorgo: una oportunidad. Proceedings of the plant breeding methods and approaches in sorghum workshop for Latin America. INTSORMIL–INIA-ICRISAT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. México. 1983; pp. 1-11.
- 14.- Castro NS. Características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas asociadas con la resistencia a la sequía en sorgo para grano. Tesis. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.1999; 256 pp.
- 15.- Feedstuffs. Referente Issue and Buyers guide. U.S.A. September 14, 2006; 77:(38):16.

- 16.- Kliment B. Comisión para el sorgo en grano de Nebraska 301 Centennial Mall South – P.O. Box 94982 Lincoln, Nebraska, USA 68509-4982. Estudio sobre la calidad del sorgo en grano de Nebraska. 1999. Disponible en: www.nebraska.agri.sorghumgrain/values.
- 17.- Waniska RD and Rooney LW. Structure and chemistry of the sorghum caryopsis. In: Smith, C.W. & R.A. Fredericksen (Ed), Sorghum origin, history, technology, and production. John Wiley & Sons Inc. New York. 2002; pp45-53.
- 18.- Shiringani AL. Evaluation of hard endosperm, bird-proof sorghum [(Sorghum bicolor L. (Moench)]. and its effect on food quality. (Dissertation Thesis M Sci. Agric.). Bloemfontein: University of Free State, 2005. Disponible en: <http://etd.uovs.ac.za/ETD-db/theses/available/etd-09122006-111434/unrestricted/ShiringaniAL.pdf>.
- 19.- Montgomery R, Conway T, Spector A. Bioquímica. 5a edición. Mosby-Year book. España. 1993.
- 20.- Hamaker BR and Bugusu B. Overview: sorghum proteins and food quality. Department of Food Science, Purdue University and the INTSORMIL CRSP West Lafayette, Indiana, USA. Journal of Cereal Science. 2003; 33: 261-269.
- 21.- Hicks C, Bean SR, Lookhart GL, Pedersen JF, Kofoed KD, Tuinstra MR, Genetic analysis of kafirins and their phenotypic correlations with feed quality traits, In vitro digestibility and seed weight in grain sorghum. Cereal Chemistry 2001;78(4):412-416.
- 22.- Mossé J, Huet J-C, Baudet J. The amino acid composition of whole sorghum grain in relation to its nitrogen content. Cereal Chemistry 1988;65(4):271-277.

- 23.- Belton PS, Delgadillo I, Halford NG, Shewryc PR. Review. Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science* 2006;4(3):272-286.
- 24.- Rooney LW and Pflugfelder RL. Factors affecting starch digestibility with special emphasis on sorghum and corn. *J. Anim. Sci.* 1986;63:1067-1623.
- 25.- Hale WH. Influence of processing on the utilization of grains (starch) by ruminants. *J. Anim. Sci.* 1973; 37: 1075–1079.
- 26.- Zinn RA, Owens FN and Ware RA. Flaking corn: Processing mechanics, quality standars and impacts on energy availability and performance of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 2002; 80: 1145-1156.
- 27.- Galyean ML, Wagner DG and Owens FN. Corn particle size and site and extent of digestion by steers. *J. Anim. Sci.* 1979; 49: 204-210.
- 28.- Corona L and Zinn RA. Influence of corn vitreousness and processing on site and extent of digestion by feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 2005; 83: Suppl. 1. p 48.
- 29.- Lee RW, Galyean ML and Lofgreen GP. Effects of mixing whole shelled and steam flaked corn in finishing diets on feedlot performance and site and extent of digestion in beef steers. *J. Anim. Sci.* 1982; 55:475-483.
- 30.- Theurer CB. Grain processing effects on starch utilization by ruminants. *J. Anim. Sci.* 1986; 63: 1649.
- 31.- Corona L, Rodriguez S, Ware RA and Zinn RA. Comparative effects of whole, ground, dry-rolled and steam-flaked corn on digestion and growth performance in feedlot cattle. *Prof. Anim. Sci.* 2005; 21: 200-206.

- 32.- Stock RA, Brink DR, Kreikemeier KK. Evaluation of early-harvested and reconstituted grain sorghum in finishing steers. J. Anim. Sci. 1987; 65: 548-556.
- 33.- Hibberd CA, Wagner DG, Hintz RL. Effect of sorghum grain variety and reconstitution on site and extent of starch and protein digestion in steers. J. Anim. Sci. 1985; 61: 703-712.
- 34.- Huck GL, Kreikemeier KK, Bolsen KK. Effect of reconstituting field-dried and early-harvested sorghum grain on the ensiling characteristics of the grain and on growth performance and carcass merit of feedlot heifers. J. Anim. Sci. 1999; 77: 1074-1081.
- 35.- Church DC, Pond WG, Pond KR. Fundamentos de Nutrición y Alimentación de Animales. 2da edición. Limusa Wiley. 2006.
- 36.- Shimada AS, Rodríguez GF, Cuarón IJA. 1986. Engorda de ganado bovino en corrales. México. 1986.
- 37.- Schake LM and Bull AY. Result of Food Processing on the Nutrient Value of Food. Collage Station, TX. Texas Agricultural Experiment. Station Technical Report. 2002; 81-91.
- 38.- Cañeque MV, Sancha SJL. Ensilado de forrajes y su empleo en la alimentación de rumiantes. Mundi-Prensa. España. 1998.
- 39.- Hart SP. Effects of altering the grain content of sorghum silage on its nutritive value. J. Animal Sci. 1990; 68; 3832-3842.

- 40.- Helm RE, Lane GT, Leighton RE. Variaciones en ácido láctico ruminal, ácidos grasos volátiles y pH con grano de sorgo reconstituido. *Journal of Dairy Science* Vol.1971; 55, 527-532.
- 41.- Guada JA. Efectos del procesado sobre la degradabilidad ruminal de proteína y almidón. Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos. Facultad de Veterinaria de Zaragoza. España. 1993. Disponible en: www.fac.españa/ciencaim/fednaIX/guadaAL.pdf
- 42.- Defoor PJ, Galyean ML, Cole NA, Jones OR. Effects of planting density and processing method on laboratory characteristics of grain sorghum for ruminants. *J. Anim. Sci.* 2000. 78:2032–2038
- 43.- Owens, F.N. and R.A. Zinn. Corn grain for cattle: Influence of processing on site and extent of digestion. 2005; pp. 78-85. Southwest Nutr. Conf., Univ. of Arizona. <http://animal.cals.arizona.edu/swnmc/2005/index.htm>
- 44.- Xiong Y, Bartle SJ, Preston RL, Meng Q. Estimating starch availability and protein degradation of steam-flaked and reconstituted sorghum grain through a gas production technique. *J. Anim. Sci.* 1990; 68:3880-3885.
- 45.- Streeter MN, Wagner DG, Hibberd CA, Owens FN. Comparison of corn with four sorghum grain hybrids: site and extent of digestion in steers. *J. Anim. Sci.* 1990; 68:3429-3440.
- 46.- Kirleis AW, Crosby KD, Housley TL. A method for quantitatively measuring vitreous endosperm area in sectioned sorghum grain. *Cereal Chemistry* 1984; 61:556–558.

- 47.- Tejada HI. Manual de laboratorio para el análisis de ingredientes usados en la alimentación animal. Patronato de Apoyo a la Investigación y Experimentación Pecuaria de México, A.C. México, D.F. 1993.
- 48.- Tejada HI. Manual de laboratorio para el análisis de ingredientes usados en la alimentación animal. Patronato de Apoyo a la Investigación y Experimentación Pecuaria de México, A.C. México, D.F. 1993. Modificado por la técnica de determinación de AGV'S por el laboratorio de Investigación del Departamento de Nutrición Animal y Bioquímica de la FMVZ de la UNAM. 2001
- 49.- PerkinElmer instruments. Cromatografía de gases, curso básico. México. Publicación privada PerkinElmer.1996.
- 50.- Burget CA, Green LE and Bonelli EJ. 1979. Chromatographic Methods in Gas Analysis. Hewlett Packard. USA.
- 51.- AOAC, Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists. In: K. Helrich, Editor, *Method 984.13*, Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA 1990.
- 52.- Rodríguez S, Calderón JF and Zinn RA. Variation in ruminal starch digestion due to dry rolling versus steam flaking corn and sorghum can be reliably predicted based on changes in starch solubility and 6-h amylase reactive insoluble starch. Proc. West. Sect. Am. Soc. Anim. Sci. 52: 2001.
- 53.- Pérez MJA, Vázquez MRJ, Rodríguez SC. Procedimientos de laboratorio para bacteriología y micología veterinarias. FMVZ-UNAM. 2ªedición. México. 1989.
- 54.- Larone DH. Medically important fungi. A guide to identification. Third edition. ASM Press Washington, D.C. American society for Microbiology. 1995.

- 55.- SAS. Users Guide Statistics. Versión 6.12 para Windows. SAS Institute. Cary, N.Y.1998.
- 56.- Snedecor GW. Statistical Methods. 1966 Iowa State University Press. Fifth edition. USA. 1966.
- 57.- Herrera HJG, Barreras SA. Manual de Procedimientos para análisis estadísticos de experimentos pecuarios. Colegio de Postgraduados. 1ra edición. México. 2000.
- 58.- Buffo RA, Weller CL. Relationships among grain sorghum quality factors. Cereal Chemistry. 1998; 75(1):100-104.
- 59.- Dorsey-Redding C, Hurburgh CR. Relationships among maize quality factors. Cereal Chemistry. 1991;68(6):602-605.
- 60.- Correa CES, Shaver RD, Pereira MN, Lauer JG, Kohn K. Relationship between corn vitreousness and ruminal *in situ* starch degradability. J. Dairy Sci. 2002; 85:3008–3012.
- 61.- Philippeau C, Le Deschault de Monredon F, and Michalet-Doreau B. Relationship between ruminal starch degradation and the physical characteristics of corn grain. J. Anim. Sci. 1999; 77:238–243.
- 62.- Chang CS. Measuring density and porosity of grain kernels using a gas pycnometer. Cereal Chemistry 1988; 65(1): 13-15
- 63.- Tamari S. Optimum design of the constant-volume gas pycnometer for determining the volume of solid particles. Measurement Science and Technology 2004; 15(4): 549-558

- 64.- Philippeau C, Landry J and Michalet-Doreau B. Influence of the protein distribution of maize endosperm on ruminal starch degradability. J. Sci. Food Agric. 2000; 80:404–408.
- 65.- Pedersen JF, Martin CR, Felker FC, Steele JL. Application of the single kernel wheat characterization technology to sorghum grain. Cereal Chemistry 1996; 73(4):421-423.
- 66.- Corona L, Owens FN, Zinn RA. Impact of corn vitreousness and processing on site and extent of digestion by feedlot cattle. J. Anim. Sci. 2006; 84:3020–3031
- 67.- Li PXP, Hardacre AK, Campanella OH, Kirkpatrick KJ. Determination of endosperm characteristics of 38 corn hybrids using the stenvert hardness test. Cereal Chemistry 1996; 73(4):466-471.
- 68.- Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. Symposium: Carbohydrate methodology, metabolism, and nutritional implications in dairy cattle. J. Dairy Sci. 1991. 74:3583-3597.
- 69.- Shimada A. Nutrición animal. México (DF):Trillas, 2005
- 70.- Sock RA, Mader F. High-moisture sorghum utilization in finishing cattle. Institute of Agricultura and Natural Resources, University of Nebraska. 2005. Consultado (on line: 27 de Junio 2007) Disponible: www.produccion-animal.com.ar.
- 71.- Stock RA, Sindt MH, Cleale RM. High-moisture corn utilization in finishing cattle. J. Animal Science. 1991; 69:1645-1656.

72.- Goerign HK, Van Soest PJ. Hemken RW. Relative susceptibility of forages to, heat damage as affected by moisture, temperature, and pH. J.Dairy Sci. 1972; 56 (1):137-143.

73.- Bechtel HE, Atkeson FW, and Hughes JS. Brown silage from atlas sorgo-chemical composition and apparent digestibility as determined by feeding to dairy cows. J. Animal Sci.1943; 2:295-302.

74.- Hill DL, and Noller CH. The apparent digestibility of protein in low moisture silages.J. Animal Sci. 1963; 22:850-858.

75.- Roffler RE, Niedenneier RP, and Baumgardt BR. Evaluation of alfalfabrome forage stored as wilted silage, lowmoisture silage, and hay. J.Dairy Sci. 1967;50:1805-1812.

76.- Tejada HI. 1993 Pruebas para evaluar la calidad de los alimentos para ruminates. Memorias del Curso Internacional Avanzado de Nutrición de Rumiantes. Colegio de Posgraduados Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas, 2-4 junio. Montecillo, México. Páginas 47-51.

77.- Phillip LE, Fellner V. Effects of bacterial inoculation of high-moisture ear corn on its aerobic stability, digestion, and utilization for growth by beef steers. J. Anim. Sci.1992;70:3178-3187

78.- Bergen WG, Cash EH, Henderson HE. Changes in nitrogenous compounds of the whole corn plant during ensiling and subsequent effects on dry matter intake by sheep. J. Anim. Sci. 1974; 39:629-637

- 79.- Zinn RA. Comparative feeding value of steam-flaked corn and sorghum in finishing diets supplemented with or without sodium bicarbonate. J. Anim. Science 1991; 69:905-916.
- 80.- Xiong Y, Bartle SJ, Preston RL, Meng Q. Estimating starch availability and protein degradation of steam-flaked and reconstituted sorghum grain through a gas production technique. J. Anim. Sci. 1990; 68:3880-3885.
- 81.- Corona L, Zinn RA. Effect of corn vitreousness and grain processing on starch digestion. J. Anim. Science 2004. 55:389-392.
- 82.- Zinn RA, Plascencia JA, Arellano GE, López SMA. Estudio comparativo sobre el sitio y la tasa de digestión de la fracción nitrogenada y del almidón de cuatro cereales procesados con vapor utilizados en dietas para bovinos de engorda. Vet. Méx. 2002; 33(4) 371-386.
- 83.- Balogun RO, Bird SH, Rowe JB. 2005. Germination temperature and time affect in vitro fermentability of sorghum grain. Division of Animal Science, School of Rural Science and Agriculture, University of New England, Armidale, NSW 2351, Australia.
- 84.- Theurer CB, Lozano O, Alio A, Delgado-Elorduy. Steam-processed corn and sorghum grain flaked at different densities alter ruminal, small intestinal, and total tract digestibility of starch by steers. J. Anim. Sci. 1999; 77:2824-2831.
- 85.- Owens FN, Zinn RA, Kim YK. 1986 Limits to starch digestion in the ruminant small intestine. J. Anim. Sci. 63:1634-1648

- 86.- Zinn RA, Barreras A, Corona L, Owens FN, Wares RA. Starch digestion by feedlot cattle: Predictions from analysis of feed and fecal starch and nitrogen. J. Anim. Sci. 2007; 85:1727-1730.
- 87.- DePeters EJ, Getachew G, Fadel JG, Corona L, Zinn RA. 2007 Influence of corn hybrid, protease and methods of processing on *in vitro* gas production. Animal Feed Science and Technology 135:157–175.
- 88.- Streeter MN, Wagner DG, Hibberd CA, Owens FN. Comparison of corn with four sorghum grain hybrids: site and extent of digestion in steers. J. Anim. Sci. 1990; 68:3429-3440.
- 89.- Altamirano DJ, Castro NS, Mendoza MGD, Cobos PMA. Degradabilidad ruminal *in vitro* de almidón de 21 variedades de sorgo (*Sorghum bicolor* L.Moench) con diferente genotipo a la sequía. Interciencia. 2004; 29 (6)329-333.

7. ANEXOS

I. TÉCNICA UTILIZADA EN EL LABORATORIO DE INVESTIGACIÓN DEL DEPARTAMENTO DE NUTRICIÓN ANIMAL Y BIOQUÍMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE AGV'S Y ÁCIDO LÁCTICO POR CROMATOGRAFÍA DE GASES

I. DETERMINACIÓN DE AGV's

- 1.- Pesar 50 g de muestra y disolver en 100 ml de agua destilada, se mezclan y se dejan refrigerar a 4°C por 24 hrs.
- 2.- Se colocan 2 capas de gasa y fibra de vidrio (pirex) y se colecta la muestra.
- 3.- Centrifugar en tubos de ensayo de 10ml a 3000rpm por 30 minutos. Tomar 5 ml del sobrenadante.
- 4.- A cada muestra se le adiciona 1ml de una solución de ácido metafosfórico y ácido fórmico al 25% en una proporción 3:1. Se filtra a través de un poro jeringa de 20 µm.
- 5.- Se centrifuga nuevamente esta mezcla por 30 minutos a 2000rpm para obtener líquido libre de sólidos y se inyecta 10^{-3} ml al cromatógrafo de gases.

Curva estándar

AGV's	<i>Estándar 5:50</i>	<i>Estándar 10:50</i>	Estándar Concentrado
Ácido acético	620.8 ppm	1241.6 ppm	6208 ppm
Ácido propiónico	317 ppm	634 ppm	3170 ppm
Ácido butírico	197.8 ppm	395.6 ppm	1978 ppm

7.- Condiciones de cromatógrafo:

Temperatura columna: 150-180°C, temperatura de detector: 180-190°C, temperatura del inyector: 180°C.

Flujos N₂ 30ml/min, H₂ 30ml/min, Aire 300ml/min.

Columna SP 1200 al 10% on chromosorb WAW 80-100+1% H₃PO₄

Los cálculos se realizaron mediante un programa en Excel, Windows XP®, en donde se colocaron los datos: áreas bajo la curva, estándares, y mediante la función de regresión lineal, se obtuvieron las concentraciones promedio de AGV's para cada muestra.

II. DETERMINACIÓN DE ÁCIDO LÁCTICO

- 1.- Se toma 1ml del extracto para ácidos grasos volátiles, se introduce en el tubo de ensaye con tapón rosca. Se le adicionan 2ml de metanol y 0.4ml de una solución al 50% de ácido sulfúrico.
- 2.- Se cierra el tubo perfectamente y se coloca en un baño de agua a 55°C por 30 minutos y se deja toda la noche a temperatura ambiente.
- 3.- Se adiciona 1ml de agua y 0.5ml de cloroformo, se cierra el tubo y se mezcla evitando emulsiones.
- 4.- Se centrifuga a 2000rpm durante 10 minutos, para que se separen las capas. Se extraen 3ml del líquido no acuoso y se inyecta al cromatógrafo.
- 5.- Condiciones de cromatógrafo temperatura columna 100°C, temperatura de detector 200°C, temperatura del inyector 100°C.

Flujos N₂ 30ml/min, H₂ 30ml/min, Aire 300ml/min.

Columna acero inoxidable 6'x 118'' chromosorb WDMCS 60/80 + 2% ácido fosfórico.

Los cálculos se realizaron mediante un programa en Excel, Windows XP®, en donde se colocaron los datos: áreas bajo la curva, estándares, y mediante la función de regresión lineal, se obtuvieron las concentraciones promedio de AL para cada muestra.

III. TÉCNICA PARA DETERMINAR NITRÓGENO AMONIAICAL

Procedimiento:

- 1.- Moler las muestras de grano seco en un molino de café, checar que toda la muestra pase por una criba del número 20. (1mm de diámetro).
- 2.- Pesar 2 g de muestra, colocarlos en matraces de destilación.

3.- Colocar 2 g de Óxido de Magnesio junto con la muestra en los tubos Tecator más 75 ml. de agua.

4.- Colocar en matraz Erlenmeyer de 250ml, 100 ml. de ácido bórico al 2.9%.

5.- Destilar la muestra a 150 ml y recuperar el nitrógeno amoniacal en el ácido bórico 2.9%. Titular con ácido clorhídrico al 0.1N.

Los cálculos se determinaron mediante la cantidad de ml HCl gastados en la titulación x Normalidad del HCl x 0.014 x 100 / g muestra. Con la ayuda de un software en Excel, Windows XP®.

IV. TÉCNICA UTILIZADA PARA DETERMINAR LA DIGESTIBILIDAD ENZIMÁTICA DEL ALMIDÓN *IN VITRO*

Objetivo: El procedimiento es usado para analizar la cantidad de almidón de una muestra dada.

Determinar la porción soluble e insoluble del almidón contenido en el grano de sorgo.

Almidón total

Reactivos:

- Solución de Sulfato de Zinc al 15% (ZnSO_4 15%). Se pesaron 150g de ZnSO_4 y se aforó a 1litro de agua destilada.
- Solución buffer: Acetato de sodio anhidro 9.91g (16.44 si es la forma trihidratada) más 7.27 ml de ácido acético glacial a 1000 ml de agua destilada.
- Solución enzimática: Se preparó diariamente, pesando enzima suficiente para tener 0.55 mg de enzima amiloglucosidasa, de *Aspergillus niger*, (SIGMA A7420-100MG), por cada tubo y mezclar con 10 ml de solución buffer por tubo.
- Solución glucotall: Se mezclaron 940 ml de ácido acético glacial, 60 ml de Toluidina al 98% (Sigma 466190) y 5 g de Tiourea (JT Baker 4123-01) y esta mezcla se conservó en un frasco de ámbar con tapa.

Procedimiento:

- 1.- Moler las muestras de grano seco en un molino de café, checar que pase toda la muestra por una criba de número 20 (1mm de diámetro).
- 2.- Colocar 0.15 g de muestra en tubos con tapa con capacidad 20ml. Cada muestra se trabaja por duplicado. Determine su tubo blanco y pese 0.09 g y 0.135 g de Almidón, (Papa Soluble, Polvo J.T. Baker 4006-1 y de Dextrosa, Anhidra, Polvo J.T.Baker 1916-01).
- 3.- Adicionar 10 ml de agua destilada a cada tubo. Tapar el frasco y se agitaron con un agitador tipo vortex a cada tubo. Se incubaron las muestras en baño María a 100° C durante 3 horas. Agitando con vortex cada 10 minutos la primera media hora y cada 30 min por el tiempo que resta. Sacar los tubos del baño María y dejarlos en reposo por 24 hrs.(Se dejan enfriar toda la noche y se continúa la técnica el siguiente día).
- 4.- Adicionar 10 ml de solución buffer-enzimática a cada tubo más una gota de tolueno. Agitar con vortex para homogenizar la muestra.
- 5.- Incubar las muestras en baño María a 50°C (máximo 55°C) por 3 horas, agitando con vortex cada 20 minutos.
- 6.- Sacar las muestras del baño María y adicionar 2 ml de ZnSO₄ al 15%. Agitar con vortex y meter los tubos en agua con hielo por 10 minutos.
- 7.- Filtre aproximadamente 0.3 ml de la solución del tubo, usando papel filtro #4 (Whatman 1004-125).
- 8.- Enumerar los tubos de ensaye limpios para glucosa. Transfiera 4 ml de glucotall (usando 940 ml de Acido Acético glacial mas 60 ml 0-Toluidine al 98% Sigma mas 5 gr de Tiourea).
Adicionar 50 µl del filtrado de cada tubo de ensaye y agregar los 4 ml de solución glucotall. Agitar con vortex, tapar los tubos con canicas e incubar a baño María a 100°C por 10 minutos.
- 9.- Encender el espectrofotómetro UV/Vis y ponga la longitud de onda a 630 nm y déjelo trabajar 30 min.

10.- Retirar los tubos del baño Maria y colocarlos en agua con hielo durante 5 minutos con la finalidad de mantenerlos a temperatura ambiente. Agitar con vortex.

11.- Poner en cero el espectrofotómetro y realice la lectura con el blanco, después con el almidón papa y posteriormente la dextrosa.

12.- Realizar la lectura de las muestras.

13.- Calcular el factor de glucosa y obtener con las absorbancias de almidón y glucosa.

REACTIVIDAD DE LA AMILOGLUCOSIDASA PARTE SOLUBLE DEL ALMIDÓN (AlmS)

Reactivos:

- Solución de Sulfato de Zinc al 15% (ZnSO_4 15%). Se pesaron 150g de ZnSO_4 y se aforó a 1litro de agua destilada.
- Solución buffer: Acetato de sodio anhidro 9.91g (16.44 si es la forma trihidratada) más 7.27 ml de ácido acético glacial a 1000 ml de agua destilada.
- Solución enzimática: Se preparó diariamente, pesando enzima suficiente para tener 0.55 mg de enzima amiloglucosidasa, de *Aspergillus niger*, (SIGMA A7420-100MG), por cada tubo y mezclar con 10 ml de solución buffer por tubo.
- Solución glucotall: Se mezclaron 940 ml de ácido acético glacial, 60 ml de Toluidina al 98% (Sigma 466190) y 5 g de Tiourea (JT Baker 4123-01) y esta mezcla se conservó en un frasco de ámbar con tapa.

Procedimiento:

1.- Moler las muestras de grano seco en un molino de café, checar que pase toda la muestra por una criba de número 20 (1mm de diámetro).

- 2.- Colocar 0.50 g de muestra en tubos con tapa con capacidad 20ml. Cada muestra se trabaja por duplicado. Determine su tubo blanco y pese 0.09 g y 0.135 g de Almidón, (Papa Soluble, Polvo J.T. Baker 4006-1 y de Dextrosa, Anhidra, Polvo J.T.Baker 1916-01).
- 3.- Adicionar 10 ml de agua destilada a cada tubo y adicionar 10 ml de solución buffer-enzimática a cada tubo más una gota de tolueno. Agitar con vortex para homogenizar la muestra. Tapar el frasco. Y se incubaron las muestras en baño Maria a 39° C (sin exceder 45°C) durante 4 horas. Agitando con vortex cada 20 minutos.
- 4.- Sacar las muestras del baño Maria y adicionar 2 ml de ZnSO₄ al 15%. Agitar con vortex y meter los tubos en agua con hielo por 10 minutos.
- 5.- Filtre aproximadamente 0.3 ml de la solución del tubo, usando papel filtro #4 (Whatman 1004-125).
- 6.- Enumerar los tubos de ensaye limpios para glucosa. Transfiera 4 ml de glucotall (usando 940 ml de Acido Acético glacial mas 60 ml 0-Toluidine al 98% Sigma mas 5 gr de Tiourea).
- Adicionar 100 µl del filtrado de cada tubo de ensaye y agregar los 4 ml de solución glucotall. Agitar con vortex, tapar los tubos con canicas e incubar a baño Maria a 100°C por 10 minutos.
- 7.- Encender el espectrofotómetro UV/Vis y ponga la longitud de onda a 630 nm y déjelo trabajar 30 min.
- 8.- Retirar los tubos del baño Maria y colocarlos en agua con hielo durante 5 minutos con la finalidad de mantenerlos a temperatura ambiente. Agitar con vortex.
- 9.- Poner en cero el espectrofotómetro y realice la lectura con el blanco, después con el almidón papa y posteriormente la dextrosa.
- 10.- Realizar la lectura de las muestras.

REACTIVIDAD ENZIMÁTICA PARTE INSOLUBLE DEL ALMIDÓN (AlmNS)

Reactivos:

- Solución de Sulfato de Zinc al 15% (ZnSO_4 15%). Se pesaron 150g de ZnSO_4 y se aforó a 1litro de agua destilada.
- Solución buffer: Usar 8.71g de Fosfato de potasio en un matraz volumétrico y se aforó a 1 litro con agua destilada. Ajustándola a pH de 6 con gotas de cloruro de amonio.
- Solución enzimática: Preparar diario. Pesar 0.035 g carbonato de calcio, 0.55 mg de enzima amiloglucosidasa de *Aspergillus niger*, (SIGMA A7420-100MG), 8 mg de α -amilasa de páncreas porcino (SIGMA 10080), 8 mg pancreatina porcina (SIGMA P-1625), 2 mg acromopeptidasa de *Achromobacter lyticus* (SIGMA A3547-500KU), y 2 mg proteasa tipo páncreas de bovino (SIGMA P-4630) por cada tubo. Y se mezclaron con 20 ml de solución buffer de fosfato de potasio por tubo.
- Solución glucotall: Se mezclaron 940 ml de ácido acético glacial, 60 ml de Toluidina al 98% (Sigma 466190) y 5 g de Tiourea (JT Baker 4123-01) y esta mezcla se conservó en un frasco de ámbar con tapa.

Procedimiento:

- 1.- Moler las muestras de grano seco en un molino de café, checar que pase toda la muestra por una criba de número 20 (1mm de diámetro).
- 2.- Colocar 0.15 g de muestra en tubos con tapa con capacidad 20ml. Cada muestra se trabaja por duplicado. Determine su tubo blanco y pese 0.09 g y 0.135 g de Almidón, (Papa Soluble, Polvo J.T. Baker 4006-1 y de Dextrosa, Anhidra, Polvo J.T.Baker 1916-01).
- 3.- Adicionar 20 ml de solución buffer-enzimática a cada tubo y una gota de tolueno. Agitar con vortex para homogenizar la muestra. Tapar el frasco. Y se incubaron las muestras en baño Maria a 39° C (sin exceder 45°C) durante 6 horas. Agitando con vortex cada 30 minutos.
- 4.- Sacar las muestras del baño Maria y adicionar 2 ml de ZnSO_4 al 15%. Agitar con vortex y meter los tubos en agua con hielo por 10 minutos.

5.- Filtre aproximadamente 0.3 ml de la solución del tubo, usando papel filtro #4 (Whatman 1004-125).

6.- Enumerar los tubos de ensaye limpios para glucosa. Transfiera 4 ml de glucotall (usando 940 ml de Acido Acético glacial mas 60 ml 0-Toluidine al 98% Sigma mas 5 gr de Tiourea).

Adicionar 50 µl del filtrado de cada tubo de ensaye. Agitar con vortex, tapar los tubos con canicas e incubar a baño Maria a 100°C por 10 minutos.

7.- Encender el espectrofotómetro UV/Vis y ponga la longitud de onda a 630 nm y déjelo trabajar 30 min.

8.- Retirar los tubos del baño Maria y colocarlos en agua con hielo durante 5 minutos con la finalidad de mantenerlos a temperatura ambiente. Agitar con vortex.

9.- Poner en cero el espectrofotómetro y realice la lectura con el blanco, después con el almidón papa y posteriormente la dextrosa.

10.- Realizar la lectura de las muestras.

11.- Para calcular el valor de Digestibilidad Ruminal Esperada (DRS) se calcularon los valores de: Almidón reactivo a la amilogucosidasa (AGR), almidón reactivo (RS), almidón reactivo insoluble (IRS) y almidón digerible insoluble (ISD) mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{➤ AGR} = (\text{AlmS}/\text{ALM}) * 100$$

$$\text{➤ RS} = (\text{AlmNS}/\text{ALM}) * 100$$

$$\text{➤ IRS} = (\text{RS}-\text{AGR})/6$$

$$\text{➤ ISD} = (100-\text{AGR}) * ((\text{IRS} / (\text{IRS} + 0.5)))$$

$$\text{➤ DRS} = (1.32 * \text{AGR}) + (0.93 * \text{ISD})$$

Ecuación de Predicción:

$$\text{Almidón insoluble} = (\text{Almidón total} - \text{Almidón soluble})/6$$

$$\text{Digestibilidad ruminal } in \text{ vitro} = (100 - \text{Almidón soluble}) (\text{Almidón insoluble}/(\text{Almidón insoluble} + 0.05))^{52}$$