

UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS
VILLAS.

FACULTAD DE QUÍMICA - FARMACIA.

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA.



TRABAJO DE DIPLOMA

**TÍTULO: Producción de cerveza empleando
integralmente el grano de sorgo.**

AUTORA: Maray Ortega Díaz.

TUTORA: Dra. Irenia Gallardo Aguilar.

Curso: 2015-2016

Santa Clara, Cuba

PENSAMIENTO

Sólo una cosa vuelve un sueño imposible: el miedo a fracasar.

Pablo Cohelo.

DEDICATORIA

Al sacrificio de mis padres, al ejemplo de mis hermanos, al amor de mi abuela, al cuidado de mi familia; las fuerzas que me impulsaron cuando nada tenía sentido. A Dios por permitirme llegar hasta el final.

AGRADECIMIENTOS

A mi hermana, mi complemento, por cuidar de mí y darme ese golpe de energía en momentos de frustración. Mady, gracias por siempre estar para sacudirme el ánimo, guiarme y pelear por mí.

A mi tutora Irenia, por la paciencia, el compromiso, el tiempo dedicado, por conducirme y ayudarme en la realización del trabajo más importante de mi carrera. Gracias profe, sin su apoyo no hubiese sido posible.

A mi madre por su lucha constante y no flaquear ante las adversidades, por sacrificarse tanto durante estos años, por dármelo todo en la vida, por ser incondicional.

A mi padre por el amor y la educación recibida, por ser un patrón a seguir, por contar con su apoyo en el transcurso de mi existencia.

A mi hermano por su protección, por inspirarme confianza y empujarme a seguir adelante. Pipo, fuiste mi referencia para mi ingreso a esta especialidad.

A mi abuela por ser lo más especial, y sagrado para mí.

A Leidy por tenerme como a una hija, por el cariño y el afecto con el que siempre me recibe. Gracias por ser tan buena madrastra, amiga, esposa y estar pendiente de cada detalle.

A mis tíos por su entrega y ser como unos padres con nosotros.

A Yilian, José Ignacio, Elizabeth, Lisyaulén, Javier, Yordany López, Lisday, Yoandy Coca, Jorge y Carlos García, por contar con su amistad. Los amigos se descubren en los tiempos difíciles y yo he descubierto que los tengo por encima de todo.

A Lisyaulén, por participar en las buenas y malas, por ser nuestra mensajera cada semana, por la constancia en hacerme comprender las asignaturas que me atragantaban, por consagrarme sus horas al estudio del próximo examen o la siguiente exposición. Fuiste un apoyo decisivo para alcanzar este reto. ¡Muchas gracias!

A Margarita, por ayudarme y aportar su servicio durante el desarrollo experimental de este trabajo.

A la profesora Yenisleidys, Arianna, José Ernesto, Dayán, Yedier, Mario y en particular a Coca por ayudarme durante esos días agotadores de trabajo en el laboratorio.

A Cristina, Eduardo, Josefa y Edel por asistir a todas las molestias ocasionadas en sus laboratorios.

A todos los profesores por los cuales he transitado y que han sido la fuente de conocimiento adquirida durante mi formación.

A todos mis compañeros de aula en especial a Suly, Roger, Maidelys, Miri, Leya, Rocío, Daya, Yura, Daviel, Pablo, Pedro y el Jarda, por compartir todo este tiempo en la universidad, un viaje duro que te enseña más de tí mismo y de lo que realmente quieres.

RESUMEN

La investigación presenta un estudio para utilizar el grano de sorgo integralmente en la producción de cerveza, con el propósito fundamental de obtener una bebida libre de gluten destinada a enfermos celíacos. Se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre el proceso y se expuso una caracterización de los parámetros fundamentales medidos al producto final. Para el desarrollo experimental se utilizó el sorgo blanco UDG-110, malteado y en forma de jarabe. En este sentido se utilizó el Software Statgraphics Centurion XV para el análisis de la etapa de fermentación; siendo la relación sólido líquido, concentración de enzimas, relación adjunto/malta y concentración de inóculo las variables independientes. Luego a los resultados obtenidos experimentalmente se les realizó un análisis estadístico, determinando que las variables de mayor influencia fueron la Relación Sólido/Líquido, la concentración de enzima y sus interrelaciones. Posteriormente se ejecutó la selección y diseño de los equipos para una planta de malteado del sorgo y de elaboración de cerveza para una producción de 1 hL/día y se determinó la factibilidad técnico-económica de obtener cerveza sustituyendo la malta de cebada y empleando un jarabe dextrinizado como adjunto cervecero.

ABSTRACT

The research presents a study to use grain sorghum fully in beer production, with the primary purpose of obtaining a gluten-free beverage intended for celiac patients. It conducted a literature review on the process and characterization of the final product key parameters measured. For the experimental development the white sorghum UDG-110, malting and in form syrup was used. In this regard the software Statgraphics Centurion XV for analysis of the fermentation step was used. The liquid- solid relation, enzyme concentration, inoculum concentration and adjunct/malt relation with independent variables were studied. After of the experimental results a statistical analysis was performed, It that the variables most influential the solid/liquid ratio, the concentration of enzyme and their interrelationships were the determining. Subsequently the selection and design of equipment for a malting sorghum plant and beer production for a production of 1 hl/day was executed and the technical and economic feasibility of obtaining beer substituting barley malt and using syrup dextrinized as an adjunct brewer was determined.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
1.1 Cerveza.....	3
1.1.1 Características de la cerveza.	4
1.2 Ingredientes de la cerveza.	4
1.2.1 Malta.	5
1.2.1.1 Diferencias entre la malta de sorgo y la malta de cebada.	5
1.2.2 Agua.....	6
1.2.3 Lúpulo.....	6
1.2.4 Levadura.	7
1.2.5 Adjuntos.....	7
1.2.5.1 Empleo de jarabes como adjuntos.....	8
1.3 Calidad de la cerveza.	9
1.3.1 Color.	10
1.3.2 Grado alcohólico.....	10
1.3.3 Espuma.....	10
1.3.4 Turbidez.....	10
1.4 Cervezas a partir de sorgo.	11
1.5 Proceso de elaboración de cerveza.....	11
1.5.1 Malteado del cereal.....	11

1.5.1.1	Etapas que conforman el malteado del cereal.....	12
1.5.1.2	Calidad del malteado.....	14
1.5.2	Maceración de la malta.....	14
1.5.2.1	Enzimas.....	15
1.5.3	Filtración previa.....	15
1.5.4	Hervidura del mosto.....	16
1.5.5	Fermentación.....	16
1.5.5.1	Tipos de fermentaciones.....	17
1.5.5.1.1	Fermentación baja o cervezas lager.....	17
1.5.5.1.2	Fermentación alta o cervezas Ale.....	18
1.6	Sorgo.....	19
1.6.1	Origen del sorgo.....	19
1.6.2	Morfología.....	20
1.6.3	Beneficios del sorgo.....	20
1.7	Problemas asociados con el uso de malta de sorgo y sorgo como adjunto cervecero en la producción de esta bebida.....	22
1.8	Enfermedad Celíaca.....	22
1.8.1	Origen de la enfermedad celíaca.....	23
1.8.2	Tratamiento de la enfermedad celíaca.....	23
CAPÍTULO 2: Desarrollo experimental.....		25
2.1	Obtención de cerveza empleando integralmente el grano de sorgo.....	25
2.1.1	Proceso de malteado.....	25
2.1.1.1	Etapas por las que está constituido el proceso (Anexo 1).....	25
2.1.1.1.1	Clasificación del grano.....	25
2.1.1.1.2	Etapas de remojo.....	26

2.1.1.1.3	Etapa de germinación.....	27
2.1.1.1.4	Etapa de secado.....	28
2.1.1.1.5	Tamizado y pulido.	29
2.1.2	Propiedades determinadas a la malta de sorgo.	30
2.1.2.1	Pérdidas del malteado.	30
2.1.2.2	Contenido de extracto.	31
2.1.3	Caracterización de la materia prima.	31
2.1.4	Obtención de jarabes enzimáticos empleados como adjuntos.	32
2.1.5	Elaboración de cerveza.	32
2.1.5.1	Análisis experimental.....	32
2.1.5.2	Determinaciones experimentales de las variables medidas.	33
2.1.5.2.1	Azúcares reductores.....	33
2.1.5.2.2	Grados Brix.....	33
2.1.5.2.3	Grado alcohólico.....	34
2.1.5.3	Maceración.....	34
2.1.5.4	Extracción del líquido y lavado.	34
2.1.5.5	Adición de los nutrientes.	35
2.1.5.6	Aireación.....	35
2.1.5.7	Filtración.....	36
2.2.1	Maceración.....	36
2.2.1.1	Otros experimentos realizados.....	41
2.2.2	Fermentación.	43
2.3	Análisis estadístico del proceso de elaboración de cerveza.....	44
2.3.1	Consumo de ART.	45

2.3.2 Grado alcohólico.....	46
2.3.3 Rendimiento.....	47
2.3.4 Productividad.....	48
2.3.5 Tiempo de fermentación.....	49
2.4 Análisis de la etapa fermentativa empleando un jarabe glucosado como adjunto para la elaboración de la cerveza.....	50
2.5 Análisis de los resultados.....	52
CAPÍTULO 3: Diseño y selección del equipamiento. Análisis económico.....	54
3.1 Proceso de producción de cerveza.....	54
3.1.1 Proceso de la producción de la cerveza.....	54
3.2 Selección preliminar del equipamiento.....	55
3.2.1 Tanques de almacenamiento.....	55
3.2.2 Cribas.....	56
3.2.3 Tanques de remojo.....	56
3.2.4 Germinador.....	56
3.2.5 Secadero.....	56
3.3 Balance de materiales.....	56
3.4 Dimensionamiento de los equipos principales.....	57
3.5 Proceso de producción de cerveza.....	59
3.5.1 Molinos.....	59
3.5.2 Transportadores.....	59
3.5.3 Macerador y tanque de cocción con Calentamiento y Agitación.....	60
3.5.4 Agitador.....	60
3.5.5 Filtro.....	60
3.5.6 Bombas.....	60

3.5.7	Tanques de almacenamiento del producto final.	61
3.6	Balances de masa y energía en la producción de cerveza.	61
3.6.1	Balances de masa.	61
3.6.2	Balances de energía.	62
3.7	Dimensionamiento de los Equipos para la elaboración de cerveza.	63
3.7.1	Tanques de mezclado con chaqueta y agitación.	63
3.7.2	Filtro de marcos y placas.	65
3.7.3	Fermentador.	65
3.7.4	Recipientes de almacenamiento para el proceso.	66
3.8	Economía del proceso.	67
3.8.1	Costo de inversión.	67
3.8.2	Costos Totales de producción.	69
3.8.3	Cálculo de la ganancia.	71
3.8.4	Indicadores dinámicos económicos.	71
3.8.5	Análisis de sensibilidad.	71
	CONCLUSIONES	74
	RECOMENDACIONES.	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	Anexos	79

INTRODUCCIÓN

Los avances de los procesos biotecnológicos están proyectados hacia la obtención de productos que además de resultar atractivos, favorezcan la salud del consumidor, potenciando la elaboración de nuevas bebidas que garanticen el desarrollo sostenible del país.

La producción de cerveza es tan antigua como la existencia del hombre, a lo largo del tiempo ha sufrido cambios en su proceso y en el empleo de materias primas, de acuerdo con las condiciones económicas imperantes, necesidades, gustos y preferencias de los consumidores.

La malta de cebada se ha empleado convencionalmente en la obtención de cerveza por su alta actividad diastática, comparada con la de otros cereales; pero para Cuba resulta una materia prima de importación. Además de esto existen personas que no pueden ingerir los alimentos producidos a partir de este cereal y otros del grupo de los TACC debido al contenido de proteína que presentan, denominados por su condición enfermos celíacos.

La celiacía es una enfermedad autoinmune de por vida, en la que el sorgo no resulta un fármaco, sino parte de la dieta de estos pacientes a partir de un producto carente de gluten o proteína dañina para estos enfermos. Cuba tiene 1200 menores de 17 años que padecen la enfermedad y unos 250 000 adultos, por lo que constituye una alternativa promisoriosa para los alimentos de estos enfermos además de que puede ayudar a la sustitución de importaciones, dadas las ventajas de su cultivo.

En la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas desde hace varios años se vienen desarrollando investigaciones para el perfeccionamiento del cultivo de sorgo y se han realizado experiencias para emplearlo como extensores en varios productos de alto valor agregado y en la facultad de Química se ha empleado malteado en la producción de bebidas, y en la obtención de almidón y de jarabes.

Las técnicas que se han venido empleando para producir cerveza de sorgo o que emplean sorgo como adjunto cervecero se basan en las técnicas de producción de cerveza de cebada con algunas modificaciones.

Teniendo en cuenta lo planteado anteriormente se traza el siguiente problema científico:

Problema científico:

Actualmente en las cervecerías cubanas las bebidas producidas son a partir de la cebada, cereal que contiene gluten. Por tanto, no es posible su ingestión para las personas que padecen de la enfermedad celíaca.

Hipótesis:

Es posible ofrecer una cerveza que pueda ser consumida por enfermos celíacos, a partir del grano de sorgo usado integralmente en su producción, si se alcanzan resultados de calidad similares a las producidas tradicionalmente a partir de malta de cebada.

Objetivo general:

Elaborar una cerveza a partir de malta de sorgo, empleando como adjunto un jarabe dextrinizado de sorgo, destinada al consumo de enfermos celíacos.

Objetivos específicos:

1. Obtener malta de sorgo, empleando los valores óptimos del estudio realizado del perfeccionamiento de la etapa del malteado del sorgo UDG-110.
2. Estudiar la etapa de maceración con cambios en los tiempos de sacarificación y el empleo de una enzima exógena.
3. Estudiar la influencia de diferentes variables en la producción de cerveza empleando como adjunto un jarabe dextrinizado de sorgo.
4. Dimensionar los equipos fundamentales del proceso, partiendo de la mejor variante obtenida a escala de laboratorio, para producciones de planta piloto.
5. Efectuar un análisis de factibilidad económica a partir de la selección de una tecnología para la obtención de cerveza carente de gluten.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Cerveza.

La cerveza es una bebida que se produce y consume en todo el mundo, sana y natural; no contiene grasas, ni colesterol y es altamente rica en vitaminas y minerales; es la bebida resultante de la fermentación alcohólica, mediante levadura seleccionada, de un mosto procedente de malta de cebada (solo o mezclado con otros productos amiláceos transformables en azúcares por digestión enzimática, siempre que estas sustancias añadidas no excedan del cincuenta por ciento en masa de la materia prima empleada), al cual se le agrega lúpulo y se somete a un proceso de cocción en agua. La cerveza es la bebida alcohólica más consumida mundialmente; y es la tercera más popular después del agua y el té **(M.Nelson, 2005)**.

La cerveza y las bebidas fermentadas de cereales son los productos más antiguos de la civilización, algunos historiadores creen que estas bebidas se remontan a 8.000 años a.c. y otros sostienen que hay datos más seguros 6.000 años a.c.

No se puede identificar o determinar los primeros productores de los cereales fermentados o señalar una zona o un pueblo responsable de las primeras producciones, se puede decir que bebidas elaboradas a base de granos o frutos existían en la antigua Mesopotamia, África, Lejano Oriente y América.

Las primeras bebidas fermentadas se elaboraban con los cereales disponibles en cada región, así en la Mesopotamia usaban trigo y mijo, en África sorgo (hoy se produce una bebida fermentada de sorgo que se consume durante la fermentación), en China y Japón de arroz y en América de maíz (Chicha). Durante el descubrimiento de América la cebada fermentada pasó a ser un ingrediente importante de la alimentación en Europa y América. Hasta el siglo XV los ingredientes principales de la cerveza eran cebada malteada, agua y levaduras, con agregados de romero y tomillo para evitar la descomposición y mejorar el sabor y posteriormente los holandeses introdujeron el lúpulo en su composición, lo cual daba sabor amargo. En la edad media los monjes europeos refinaron el proceso de producción de cerveza con malta y el agregado de lúpulo por su sabor amargo y las propiedades conservantes del mismo **(Vicente, 2013)**.

1.1.1 Características de la cerveza.

La cerveza debe cumplir unos requisitos mínimos a fin de ser apta para su consumo. Entre otros: acidez total no superior a 0,3 %; anhídrido carbónico superior a 3 g/L; contenido en glicerina inferior a 3 g/L; pH comprendido entre 3,5 y 5; contenido en cenizas no superior al 0,4 % en masa; contenido máximo en metales pesados (cobre: 1,0 ppm; zinc: 1,0 ppm; plomo: 0,2 ppm; arsénico: 0,1 ppm; y cobalto: 50 ppb); contenido máximo en ácido fosfórico no superior a los 0,12 g por 100 g de cerveza; hidratos de carbono no superiores a 7,5 por 100 g de cerveza. Únicamente podrán utilizarse en la elaboración de las cervezas aquellos aditivos legalmente permitidos.

Se considerarán cervezas no aptas para el consumo aquellas que se presenten turbias o que contengan un sedimento apreciable a simple vista (a excepción de las refermentadas en su propio envase); las que estén alteradas; las adulteradas y las elaboradas mediante procesos o con materias primas o sustancias no autorizadas **(Gopal, 2015)**.

El proceso fundamental para producir cerveza a partir de cereales comprende dos etapas fundamentales: malteado y fermentación.

Los carbohidratos como el almidón, se degradan a moléculas más pequeñas por la acción de las enzimas de la malta, para que puedan ser posteriormente utilizados por la levadura; el modo tradicional de producir las enzimas y la degradación enzimática de los carbohidratos ha sido el malteado. Según lo descrito por **(Reed et al., 1987)**, para la producción de cerveza los mostos son enzimáticamente hidrolizados hasta el grado deseado, así mismo son clarificados y calentados. Las razones para calentar el mosto son: para esterilizarlo, precipitar la proteína, solubilizar e isomerizar los componentes del lúpulo, para generar sabores a través de reacciones de oscurecimiento no enzimático y para concentrarlo. Las enzimas usadas para la conversión de los almidones de los cereales se obtienen de forma endógena, malteando a los granos. Tradicionalmente al hablar de malta se sobrentiende malta de cebada, pero existen maltas de trigo, arroz, sorgo, etc **(Reed et al., 1987)**.

1.2 Ingredientes de la cerveza.

Los ingredientes básicos que intervienen en la elaboración de la cerveza son: la malta, agua, lúpulo, levadura y adjunto.

1.2.1 Malta.

Constituye uno de los elementos iniciales en la elaboración de la cerveza, compuesta principalmente por semillas de cebada aunque a veces se puede sustituir por otro cereal que ha germinado durante un período limitado, hasta que han brotado las raicillas de unos dos o tres centímetros y posteriormente desecados y retiradas las mismas. La cerveza se puede producir con cualquier cereal que pueda ser "malteado" (es decir cualquier grano que posea almidón y sea susceptible de germinar); la cebada posee entre un 60%-65% de almidón.

Aproximadamente el 80 % del grano de los cereales está compuesto por hidratos de carbono y dentro de ellos el almidón es el que en mayor proporción se encuentra, como se aprecia en la tabla 1.1 referenciado en (Nieblas, 2015).

Tabla 1.1. Composición en hidratos de carbono de los cereales.

Cereal	Almidón	Celulosa	Hemicelulosa	b -glucanas	Pentosanas	Azúcares libres
Arroz elaborado	85	1	2	0,1	0,9	0,4
Avena entera	-	-	-	4,6	3,2	1,3
Cebada	-	-	-	5,8	7,5	3,5
Centeno	-	-	-	2,4	6,4	7,1
Maíz	70	2	3	-	6,2	1,9
Sorgo	75	2,5	2,5	-	-	2
Trigo	60	2	5	0,8	4,9	2,3

1.2.1.1 Diferencias entre la malta de sorgo y la malta de cebada.

Si se pretende elaborar bebidas a partir de sorgo para sustituir totalmente la cebada, se debe conocer primeramente los contrastes entre las maltas de ambos cereales. De acuerdo a esto, (Lymugabe et al., 2012) resumen las diferencias fisiológicas más importantes entre las mismas. La primera diferencia consiste en las enzimas que degradan el endospermo. Durante la germinación, la hormona ácido giberélico, a baja concentración (0.1-0.2 ppm) induce a la capa aleurona de la cebada a la producción de

enzimas como α -amilasa, proteasa, pentosanasas y endo- β -glucanasa que degradan el endospermo, pero esta hormona no desempeña tal papel en el desarrollo de la enzima en el sorgo. Por ejemplo, en el sorgo, la α -amilasa y la carboxipeptidasas son producidas por el escutelo, mientras la endo- β -glucanasa, dextrinasa límite y la endo-proteasa crecen en el endospermo almidonado. En cambio, en el malteado de cebada la α -amilasa, endo-proteasa, dextrina límite y endo- β -glucanasa crecen en la capa aleurona, mientras que la carboxipeptidasas y β -amilasa se encuentran en el endospermo almidonado (**Palmer et al., 1989**) referenciado en (**Díaz, 2014**).

La segunda contradicción está relacionada con las características del endospermo. El endospermo del sorgo malteado mantiene la compactación del almidón y no es desintegrado como en los granos de malta de cebada (**Palmer, 1989**). El tercer contraste radica en el nivel de enzimas en los granos. Los granos de malta de sorgo contienen bajo nivel de endo- β -glucanasa y β -amilasa (**Aisien and Palmer, 1983**). La cuarta incongruencia radica en las pérdidas durante el malteado. Las pérdidas del malteado (respiración y echar raíces) de la malta de sorgo son alrededor del 20 %, mientras que las pérdidas del malteado de la malta de cebada es de 7 % después de 6 días de crecimiento a 25 °C (**Palmer et al., 1989**).

1.2.2 Agua.

Interviene en los momentos iniciales de mezclado con la malta e introduce un sabor característico. En primer lugar tiene que ser bacteriológicamente limpia. Como la cerveza está constituida como mínimo por un 90 % de agua, este ingrediente es tan importante que define el tipo de cerveza que se pueda elaborar en una zona. Las cervezas de baja fermentación necesitan agua blanda, con poca cal, y las cervezas de alta fermentación necesitan agua dura, con muchas sales. Debido a la necesidad de tener asegurada la suficiente agua y de una calidad constante, las cervecerías se solían construir alrededor o encima de un manantial. Por eso las buenas cervezas no se fabrican nunca fuera de su lugar de origen, porque pueden perder gran parte de su sabor original o de su calidad al tener que tratar el agua químicamente para obtener el mismo gusto.

1.2.3 Lúpulo.

El humus lúpulos es un ingrediente relativamente moderno en la cerveza, se trata de una planta trepadora de la familia del cannabis que es la encargada de proporcionar además de un sabor amargo característico, llega a estabilizar la espuma. El lúpulo contribuye decisivamente a su conservación. Además obra como eficaz antiséptico y estabilizador.

También sirve para detener la fermentación acética y clarificar el líquido, causando la precipitación de las sustancias albuminosas. El ácido del lúpulo (ácido α) tiene un suave efecto antibiótico contra las bacterias Gram positivas, y favorece la actividad de la levadura de malteado. El efecto organoléptico sobre la cerveza es muy diferente. La variedad y el frescor del lúpulo influyen muy sensiblemente en la calidad final de la cerveza. Los ácidos del lúpulo protegen a la levadura, de la competencia por los nutrientes, de las bacterias, ofreciendo mayores rendimientos alcohólicos en la fermentación.

1.2.4 Levadura.

Se denomina así a los organismos unicelulares (de tamaño 5 a 10 micras) que transforman mediante fermentación los glúcidos y los aminoácidos de los cereales en alcohol etílico y dióxido de carbono (CO₂). La forma de las células de las levaduras cerveceras puede ser esférica, elipsoidal, cilíndrica o sumamente alargada, en agrupaciones de dos, cadenas cortas o racimos o bien sin agruparse; pueden formar o no pseudomicelio. La apariencia de las colonias es muy diversa: de color crema o ligeramente café, de lisas a rugosas, en ocasiones sectorizadas, brillantes u opacas. Esporulan formando de una a cuatro ascosporas de forma redonda a ligeramente elipsoidal. En general las levaduras fermentan y asimilan la glucosa, la fructosa, la sacarosa y la maltosa, además se sabe que no pueden utilizar como fuente de nitrógeno el nitrato (**García and Garibay, 1994**).

1.2.5 Adjuntos.

Materias primas que sustituyan parcialmente a la malta, o al extracto de malta en la elaboración de cerveza. Material proveedor de carbohidratos fermentables que no contribuyen con enzimas y poco o nada de nitrógeno soluble, compuestos que imparten sabor al producto terminado. Su empleo no deberá ser en su conjunto superior al 45% en relación al extracto primitivo, no obstante hay recetas donde se trabaja con el 50% de adjunto.

El almidón de los adjuntos es degradado mediante la acción de las enzimas de la malta a dextrinas, maltotriosas, maltosa y trazas de glucosa. Estos carbohidratos son los responsables de dar cuerpo a la cerveza y proveen a la levadura de substrato para que pueda efectuar su acción fermentativa. Los adjuntos son productos refinados con menos de 0.7% de grasa y de 1% de fibra. Además, deben llenar especificaciones de tamaño de

partícula, el cual debe ser intermedio para favorecer los procesos de filtración (SERNA, 1996).

Cuando se utilizan adjuntos cerveceros para elaborar cerveza se deben tener en cuenta las temperaturas de gelatinización de estos cereales utilizados. La cebada se puede añadir directamente al macerado principal junto con la malta. Los grits de maíz y arroz tienen temperaturas de gelatinización entre 61.5-73.9°C y 61.1-77.8 °C respectivamente, para el almidón de sorgo la temperatura de gelatinización oscila de 71 a 80 °C (**Ortega, 2001**).

El sorgo es principalmente utilizado como un adjunto porque provee extracto con un costo inferior que el de la malta de cebada y es fácilmente disponible. Además es consistente en el término de composición, disponibilidad y produce un espectro de azúcar fermentable y de dextrina parecido al producido por la malta de cebada. Tiene el sabor dulce y fino que es compatible con muchos estilos de cerveza, es también utilizado como adjunto porque baja la proteína y el polifenol contenido en la cerveza (**Ogbeide, 2011**). También se consideran adjuntos cerveceros a los almidones y azúcares de otras materias de origen vegetal.

1.2.5.1 Empleo de jarabes como adjuntos.

A partir del almidón se pueden obtener diferentes tipos de jarabes, como el jarabe de almidón dextrinizado, jarabe de maltosa, jarabe de glucosa o jarabe de fructosa. El almidón para fabricar los jarabes se extrae principalmente del maíz, aunque también se puede extraer de otros cereales como el sorgo (**Medina, 2015**). Un concepto muy importante a la hora de hablar de jarabes obtenidos del almidón, es el grado de conversión de dextrosa equivalente (ED), esta es una forma de medida del porcentaje de enlaces glucosídicos que han sido hidrolizados, es decir, el grado de conversión de almidón a glucosa.

El almidón como tal tendría un ED de 0, mientras que si todo el almidón fuera transformado a glucosa entonces el ED sería de 100.

En el proceso de obtención de jarabe, en primer lugar se acondiciona el almidón, después a este almidón se le trata con ácido o bien con una enzima llamada alfa amilasa, endoenzima que hidroliza enlaces glucosídicos α 1-4 al azar, conociéndose por esta razón como enzima tijera y que generalmente muestra una efectividad óptima de trabajo en un rango de pH que puede variar entre 5,5 - 7,10. En este proceso llamado licuefacción, se

obtiene un jarabe dextrinizado con un grado ED entre 15 – 25%, aunque otros autores reportan valores entre 8-20 %. Estos tipos de jarabes no cristalizan y se emplean como agentes espesantes y estabilizadores en un gran número de alimentos. Son la base para la producción industrial de todos los otros jarabes.

A este jarabe dextrinizado se le trata con una enzima glucoamilasa dando un jarabe de glucosa con un ED de 90-95%. Mientras que si se les trata con beta amilasas se obtienen jarabes de maltosa con ED 70. Cuanto más alto es el ED, los jarabes son más dulces ya que tienen mayor cantidad de glucosa libre.

La ventaja de los jarabes es su alta versatilidad: dextrinizados, maltosados, glucosados, fructosados y más nichos de mercado ya que están compitiendo fuertemente con el azúcar de caña.

En la digestibilidad de almidones como materia prima, muchos factores como el tamaño de partícula, relación de amilosa - amilopectina, extensión de la asociación molecular entre los componentes del almidón, grado de cristalinidad, longitud de la cadena de amilosa y presencia de complejos lípidos - amilosa, juegan un papel importante en la degradación hidrolítica. En ocasiones se utilizan jarabes glucosados o maltosados, primordialmente para cervezas ligeras **(Serna, 2005)**.

1.3 Calidad de la cerveza.

La calidad de la cerveza naturalmente presupone la ausencia de aspectos reconocidos generalmente como indeseables. La calidad de la cerveza depende de varios factores que tienen relación con las materias primas utilizadas, con el proceso de elaboración y principalmente con el mercado consumidor que evalúa esta calidad. Entre los parámetros más importantes de evaluación de calidad están el sabor, la presencia y permanencia de espuma, color, grado alcohólico y la presencia de residuos o precipitados (estabilidad).

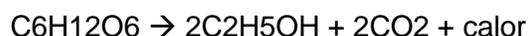
Las características físico-químicas de la cerveza son los términos que se usan para definir los requerimientos de los cuerpos regulatorios, pero como definición de la calidad de una cerveza, el análisis químico es tanto limitado como ilimitado. Es ilimitado porque las técnicas analíticas modernas pueden medir miles de compuestos dentro de la cerveza, la mayoría de los cuales no tienen influencia reconocida en el sabor, referenciado en **(Valenzuela, 2007)**.

1.3.1 Color.

El color del mosto se intensifica durante la ebullición, si la ebullición es prolongada, en especial a presión, se produce un marcado oscurecimiento. El pH elevado y el oxígeno, también favorecen la coloración intensa. Los dos principales fenómenos que intensifican el color son: la oxidación de polifenoles y la interacción de carbohidratos y compuestos nitrogenados (**Hoseney, 1996**).

1.3.2 Grado alcohólico.

El etanol se forma durante la etapa de fermentación del mosto (proceso anaeróbico), en el cual la levadura convierte la glucosa en etanol y dióxido de carbono según la siguiente ecuación estequiométrica:



Los principales productos de fermentación son etanol y CO_2 , aunque también se forman numerosos subproductos, que contribuyen de forma importante al aroma de la cerveza. Al respecto los ácidos orgánicos, alcoholes y ésteres son especialmente importantes.

El porcentaje de azúcares fermentables en el extracto total determina el contenido alcohólico en el producto final. La concentración de glucosa debe estar alrededor del 7% para obtener un 4% v/v de alcohol en la cerveza (**Vicente, 2013**).

1.3.3 Espuma.

La formación de espuma es uno de los factores más importantes en la evaluación de calidad que realizan los consumidores, ya que transmite la primera impresión del producto tan pronto es servido. La espuma se forma principalmente por el CO_2 disuelto en el líquido y debido al contenido proteico de la cerveza.

1.3.4 Turbidez.

Puesto que la cerveza es rica en polifenoles y polipéptidos, no resulta para nada sorprendente que tenga tendencia a formar partículas en el tiempo. Con excepción de dos tipos de cervezas de ciertos nichos, como la cerveza de trigo o la cerveza fermentada en botellas agitadas, la turbidez, es generalmente inaceptable para el consumidor y, además, una preocupación para el cervecero.

La pérdida de brillo, el descenso de la transparencia, el grado de enturbiamiento, incluso la floculación, precipitación y sedimentación, son las sucesivas manifestaciones visuales de la falta de estabilidad o inestabilidad de la cerveza. Así, la turbidez u opacidad de la

cerveza se puede deber a las siguientes causas: biológica, coloidal y una química, ésta última debido a diversos agentes como el oxalato de calcio, referenciado en **(Valenzuela, 2007)**.

1.4 Cervezas a partir de sorgo.

En el continente africano se han desarrollado procesos industriales en la búsqueda de una nueva materia prima para la obtención de cervezas a partir de sorgo, el sorgo rojo es la variedad principal usada para producir las cervezas tradicionales "opacas". Las cervezas africanas tradicionales de sorgo son muy ricas en calorías, vitaminas en grupo B incluyendo ácido fólico y nicotínico, tiamina, riboflavina, y aminoácidos esenciales como lisina. Según **(Lymugabe et al., 2012)** referenciado en **(Carvajal, 2014)** de los tipos que se producen se encuentran la Ikgigage de Rwanda, Merissa de Sudan, Doro de Zimbabwe, Dolo de Burkina Faso, Pito y Burukutu de Nigeria y Amgba o bili de Cameroon.

De acuerdo a la literatura en Chile la primera cerveza a partir de sorgo es denominada "Mungku", su precio es de \$1.900 la botella de 330 cc.

Brasil ha desarrollado investigaciones sobre el tema de las bebidas a partir del sorgo, pero hasta la actualidad solo se ha desarrollado la producción de cerveza de manera casera o artesanal. En México también se han realizado estudios que han demostrado la factibilidad de utilizar sorgo para producir malta y adjuntos cerveceros. Este cereal tiene un costo más bajo que la cebada y otros cereales usados como adjuntos y es el segundo cultivo más producido en ese país **(Carvajal, 2014)**.

1.5 Proceso de elaboración de cerveza.

El proceso de producción de cerveza consta de las siguientes etapas: 1) malteado, 2) maceración, 3) filtración, 4) hervidura del mosto, 5) fermentación, maduración, y 6) filtración y esterilización **(M.Moll, 1991)** referenciado en **(Carvajal, 2014)**.

1.5.1 Malteado del cereal.

El objetivo es obtener al mismo tiempo, el almidón y las enzimas (la mayoría de tipo α -amilasa y β -amilasa) que permiten convertirlo en azúcares fermentables (maltosa). Cualquier grano puede ser malteado, pero cuando no se especifica otro origen, se asume que es de cebada. La malta se hace germinar parcialmente, después se seca y, a veces, también se tuesta. Durante el malteo se presenta también una intensa actividad enzimática sobre la pared celular: las proteasas transforman proteínas insolubles en

aminoácidos solubles y las β - glucanasas liberan glucosa; por ello el grano, que inicialmente es duro, se vuelve suave y harinoso.

1.5.1.1 Etapas que conforman el malteado del cereal.

Clasificación del grano: Esta etapa es fundamental para que el grano no llegue con una carga microbiana alta, por lo que es necesario controlar la humedad y la cantidad de proteínas.

Etapa de remojo: El objetivo del remojo es que los granos absorban suficiente cantidad de agua bajo condiciones aeróbicas, para lo cual son sumergidos en agua hasta conseguir un nivel de humedad del 42 % a 45 % aproximadamente. El remojo de granos de cereal en agua es ampliamente reconocido como la etapa más crítica del proceso de malteado.

Durante el proceso de elaboración de la cerveza y malta Western, el malteado comienza con el remojo de la cebada en agua durante dos días a 10-16°C, con el fin de aumentar el contenido de humedad a alrededor del 45 % (**M.Moll, 1991**). Periódicamente, el agua se drena temporalmente y se proporciona aireación, evitando de este modo las condiciones anaeróbicas que pueden causar daños al embrión del grano.

En África, el proceso de malteado de sorgo también comienza con el remojo de los granos en agua de 10 a 24 h a temperatura ambiente (**Maoura and Pourquoi, 2009**). El período de remojo en un momento dado varía de acuerdo con la variedad del sorgo. Con respecto al nivel de humedad alcanzada existen diferentes criterios. Una variación en el contenido de humedad de 32,4 a 43,4 % puede ser observada después del remojo por 24 h. Sin embargo, (**Novielle, 1966**) reportó otro intervalo más estrecho hasta llegar a un valor mayor para este parámetros (42 a 48 %). Por otra parte, (**Owuama and Asheno, 1994**) reflejó que un aumento en la humedad con un tiempo de reposo de entre 12 y 20 h a 30°C conlleva al aumento correspondiente de azúcares reductores. El nivel de aumento de estas características de la malta de sorgo parece ser directamente proporcional a su poder diastático (**Pathirana et al., 1983**). No obstante, este autor concluyó que el tiempo de remojo tiene poco efecto sobre el poder diastático de malta de sorgo. Se ha demostrado que el poder diastático de malta y el nivel de amino nitrógeno libre (FAN) se favorecen con la temperatura de remojo de 30°C. Para el remojo se han empleado distintas concentraciones de soluciones alcalinas desde 0,1% hasta 0.5%, y se ha demostrado que mejora significativamente la actividad diastática de la malta de sorgo especialmente la actividad β -amilasa (**Okolo and Ezeogu, 1996b**).

Etapa de germinación: El objetivo es fomentar el desarrollo y crecimiento del embrión del grano para conseguir la modificación requerida del grano y desarrollo de las enzimas. Se recomienda la germinación de los granos de sorgo a una temperatura de entre 25 y 30°C para el desarrollo de un buen poder diastático (**Novielle, 1966**). De acuerdo a trabajos preliminares, se obtuvieron a 30°C, y de 3 a 7 días después de la germinación, maltas bien modificadas con un alto poder diastático, y altos niveles de extracto, de azúcares y nitrógeno amino libre. A pesar de que el tiempo de germinación y la temperatura óptimas varían con la variedad de sorgo (**Novielle, 1966**).

Para la combinación de la actividad α -amilasa y β -amilasa se ha demostrado que el tiempo de germinación en las variedades de sorgos amarillos y rojos debe ser mayor que en las variedades de sorgo blanco a una temperatura de 30°C. Sin embargo, la germinación del sorgo a temperaturas de 35 ° C o a temperaturas más bajas entre 15 y 20 °C, se afecta la actividad de amilasa y por consiguiente reduce el poder diastático.

Etapa de secado: El objetivo es remover la humedad, prevenir un posterior crecimiento y modificación, conseguir un producto estable que pueda ser almacenado y transportado, preservar las enzimas y así evitar la vitrificación del grano, además desarrollar y estabilizar propiedades como el sabor y color, remover sabores indeseables, inhibir la formación de compuestos químicos indeseables y secar los brotes para permitir su remoción. La duración depende del tipo de malta y se deben lograr humedades inferiores al 5% (**Gallardo, 2012**).

Este secado tiene el objetivo de detener el crecimiento del embrión y la actividad enzimática, y reducir al mínimo la desnaturalización de la enzima (**Lymugabe et al., 2012**). Por tal motivo es que en la etapa de secado no se utilizan altas temperaturas, en la literatura se reportan varios estudios que fundamentan lo anterior. Por ejemplo, en el proceso de fabricación de la cerveza tradicional africana de sorgo, los granos germinados son secados bajo el sol y se almacenan bajo la protección durante la noche para evitar la rehidratación. Generalmente, esta etapa de secado tarda 2-3 días dependiendo de la intensidad de la luz del sol. Sin embargo, en el proceso de fabricación de la cerveza occidental, los granos de cebada germinados se secan en un proceso de dos etapas. Primero se seca a 50-60°C y después se curan a 80-110°C (**M.Moll, 1991**). Como parte del proceso de malteado del sorgo, (**Novielle, 1966**) abogó por el secado al horno de la malta hasta 50°C. Sin embargo, mientras que los períodos del secado a 80°C pueden mejorar el sabor de la malta, una temperatura de este tipo puede dañar la actividad

enzimática de la malta y reducir los compuestos volátiles. Por otra parte, el secado de la malta en dos etapas, inicialmente a 55°C y posteriormente a 65°C, se ha demostrado que producen buenas maltas con una considerable reducción en la humedad y un contenido de azúcar superior al del secado en una única temperatura de 65°C (**Owuama and Asheno, 1994**).

1.5.1.2 Calidad del malteado.

El proceso de malteado consiste fundamentalmente en solubilizar los almidones, proteínas, productos de degradación enzimáticos, vitaminas, minerales, componentes responsables del color y del aroma, y enzimas. La calidad de la malta será adecuada si presenta: buena modificación del endospermo, bajo contenido en proteína, alto contenido de extractos y de azúcares reductores y gran poder enzimático. Efectivamente, el contenido en azúcares y la atenuación límite de un mosto son parámetros importantes de la calidad de la malta, aunque una alta atenuación límite no implica obligatoriamente que el almidón haya sido suficientemente modificado durante el malteado. Es importante para la calidad de la malta que tenga una modificación buena y regular para que las barreras físicas estén rotas y pueda existir una adecuada movilidad y acción enzimática.

En este sentido se ha puesto de manifiesto que al principio de la germinación la rápida desagregación de las paredes celulares, catalizada por las enzimas, parece estar asociada a la mayor permeabilidad de esta región del grano. Además la matriz proteica de los granos pequeños de almidón permanecería intacta en su mayor parte, por lo que estos serían inalcanzables por las enzimas amilolíticas. De esta forma una buena modificación da lugar a endospermos amorfos, mientras que una mala modificación muestra endospermos vítreos. En efecto, los gránulos de almidón pequeños son menos atacados que los grandes. La razón no está en la estructura de la amilosa y la amilopectina, sino en la diferente proporción de proteína presente en la malta. La matriz proteica estará más intacta conforme aumente el contenido proteínico de la malta, de tal manera que al formarse una película proteica alrededor de los gránulos de almidón se inhibe la amilólisis.

1.5.2 Maceración de la malta.

El objetivo de esta etapa es realizar el desdoblamiento o hidrólisis del almidón a maltosa, la que pasa más fácilmente a la forma más simple de azúcar, la glucosa, por la acción de las enzimas. En esta etapa se mezcla el grano molido con agua, que ha sido previamente calentada. Se trata de conseguir una mezcla homogénea, sin grumos a partir de la cual se inicia el proceso de extracción por vía enzimática. La temperatura y el tiempo son dos

factores imprescindibles a chequear, pues con los escalones de temperatura y las pausas en tiempos determinados se logra la transferencia de todas las sustancias importantes al mosto. En este proceso los almidones de la malta son transformados en azúcares, siendo muy importantes los procesos de disociación de las proteínas y de los fosfatos orgánicos, que influyen significativamente en la acidez del macerado.

1.5.2.1 Enzimas.

Las enzimas son catalizadores biológicos (proteínas), entre sus características se encuentra la capacidad de acelerar ciertas reacciones químicas, una de sus características fundamentales es su elevada especificidad.

En la obtención de la malta intervienen cuatro tipos de enzimas:

Amilolíticas: responsables de la solubilización de la fécula y su posterior sacarificación. Intervienen los siguientes grupos de enzimas:

Beta-amilasa: Actúa produciendo maltosa sobre la cadena lineal de glucosa. Se obtiene 68-84% de maltosa, dependiendo del origen de la amilasa. La temperatura óptima de trabajo es de 60 - 70°C pH, entre 4,6 – 5.

Alfa-amilasa: Actúa en enlaces 1,4 de almidón, produciendo unidades de dextrinas. La temperatura óptima de trabajo es de 70 - 76 °C y un pH 4,6-5.

Proteolíticas: Desdoblan las proteínas en compuestos más sencillos, como péptidos, aminoácidos.

Fitasas: Enzimas importantes porque ayudan a establecer y mantener el pH de la mezcla agua-malta durante la maceración.

Beta-gluconasas: Actúan sobre la beta-gluconasas que son un grupo lineal de polisacáridos, consistente en unidades de glucosa con enlaces β (1,4) 70%, β (1,3) 30% que aumentan la viscosidad de la solución. Estos se encuentran en altas cantidades en maltas mal disgregadas y en cereales no malteados referenciado en **(Carvajal, 2014)**.

1.5.3 Filtración previa.

El mosto, que tiene muchas partículas en suspensión, debe ser filtrado convenientemente para que quede un mosto limpio libre de impurezas que molesten a la fermentación, es por esta razón por la que la malta remojada que existe al final del proceso anterior con forma de masa espesa sobrante (denominada "afrecho") se retira y se emplea como subproducto para la elaboración de alimento para los animales. Antiguamente se hacía

con unas cubas especiales con perforaciones en el fondo que se denominaban: "cubas de filtración". A esta fase de la filtración se la suele denominar primera filtración, la segunda se hace tras la fermentación. El mosto filtrado y esterilizado no debe ponerse en contacto con el aire.

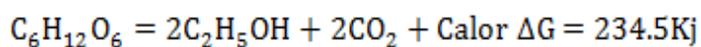
1.5.4 Hervidura del mosto.

Tras el filtrado se introduce el mosto filtrado en una olla y se pone a hervir durante algún tiempo (puede durar casi una hora) con el objeto de esterilizarlo de bacterias que hayan podido aparecer durante los procesos anteriores, en este momento se añade el lúpulo con un doble objetivo: proporcionar un aroma característico y al mismo tiempo frenar los procesos enzimáticos anteriores. El tiempo de cocción tiene dependencias de la receta cervecera, pero suele durar algunas horas. Se suele acabar esta fase con una prueba de contenido de iodo.

1.5.5 Fermentación.

La fermentación es un proceso aparentemente sencillo. Se añade la levadura al mosto enfriado, y empiezan a multiplicarse, consumiendo oxígeno y nutrientes. Siguen multiplicándose hasta que se acaba el oxígeno. Es entonces cuando empiezan a procesar los azúcares del mosto. La fermentación puede ser tan enérgica y se puede generar tanto CO₂ que se llega a formar una capa de espuma de más de treinta centímetros en la superficie de la cerveza. Durante la fermentación se forma CO₂, alcohol y otros subproductos, como alcoholes fuel. Los alcoholes fuel son una mezcla de ácidos orgánicos, alcoholes altos (propilo, butilo y amilo), aldehídos y esterres, que se conocen como congéneres. Son estos congéneres los presuntos causantes de las resacas.

La fermentación alcohólica en términos más simples es la transformación del azúcar a anhídrido carbónico y etanol, mediante la acción de las levaduras. Y puede ser representada por la ecuación siguiente:



Para medir la eficiencia del proceso fermentativo se emplean varios indicadores, los mismos se muestran a continuación (**Fabelo, 1999**).

Rendimiento alcohol–sustrato

$$Y^{P/S} \% = \frac{\%Alc * \rho_{etanol}}{\text{Consumo ART}}$$

Eficiencia de la fermentación

$$Efic_{Ferm} = \frac{\text{Alcohol}_{produc}}{\text{Alcohol}_{teórico}} * 100$$

Productividad

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Conc}_{prod}}{\text{Tiempo}_{ferment}} \text{ (g/L - h)}$$

Se sabe que la fermentación está completa o ha culminado cuando la masa deja de burbujear y la levadura se endurece yendo al fondo del fermentador. A estas alturas, el licor fermentado es conocido como fermento y está listo para ser destilado (**Cedeño, 2015**).

1.5.5.1 Tipos de fermentaciones.

Existen muchísimos tipos de cerveza, teniendo en cuenta el modo de fermentación se pueden distinguir tres categorías: fermentación baja, fermentación alta y fermentación espontánea.

1.5.5.1.1 Fermentación baja o cervezas lager.

La palabra Lager se deriva del vocablo alemán “lagern” que significa guarda o permanencia en bodega y se refiere al largo período de reposo de la cerveza para una lenta fermentación. Este proceso se realiza a bajas temperaturas (10 a 12°C), y en él la levadura se mantiene al fondo del estanque permitiendo que el lúpulo y la cebada malteada dominen el aroma y sabor del producto

Según Compton (1977), las levaduras “bajas” fueron empleadas por primera vez en Baviera para producir las cervezas llamadas Lager o Lagern. Estas levaduras se definen como aquellas que al final de la fermentación se van al fondo del tanque de fermentador. Las levaduras *Saccharomyces carlsbergensis* y *Saccharomyces cerevisiae* de cervecería se clasifican de acuerdo con su modo de acción. *S. carlsbergensis* es una levadura de fondo que no suele formar esporas, se adapta bien a la fermentación lenta a bajas

temperaturas y es la preferida para elaborar cerveza tipo Lager. La levadura de *S. cerevisiae* produce una fuerte fermentación a temperatura elevada y tiende a flotar en la superficie. Es preferida para la elaboración de cerveza tipo pilsener.

1.5.5.1.2 Fermentación alta o cervezas Ale.

La cerveza tipo Ale se originó en Baviera en la época medieval y posteriormente ha llegado a ser el tipo predominante en el mundo. Esta cerveza es, por tradición, el producto de la fermentación de las cepas “de superficie”, de *Saccharomyces cerevisiae*, denominada así debido a que una parte de la levadura sube hasta formar una densa “cabeza de levaduras” en la superficie del fermentador.

La fermentación de la cerveza Ale ocurre de manera más rápida y a temperaturas de 20° C aproximadamente, actuando la levadura en la superficie del mosto. Además, tienen un elevado porcentaje de alcohol y son muy aromáticas.

La cerveza tipo Ale es distinta de la cerveza Lager por la disminución más rápida del extracto de azúcar en la etapa de fermentación, causada por el uso de levadura *Saccharomyces cerevisiae*, que permanece en suspensión, y por las temperaturas más altas utilizadas (20 - 23°C).

Las levaduras “altas” se pueden diferenciar de las “bajas” por fermentar el trisacárido rafinosa hasta un tercio, al formar sólo fructosa y melibiosa, pues les falta la enzima melibiasa que sigue descomponiendo la melibiosa, en glucosa y galactosa, ambas fermentables (**Novielle, 1966**).

1.5.5.2 Limitaciones del proceso de fermentación.

La determinación de los factores que limitan la glucólisis fermentativa del etanol son complejos debido a la interrelación existente y a la naturaleza de los parámetros intervinientes durante el proceso de fermentación como son: concentración de etanol resultante: una de las principales limitaciones del proceso, es la resistencia de las levaduras a las concentraciones de etanol que se llegan a producir durante la fermentación, algunos microorganismos como el *Saccharomyces Cerevisiae* pueden llegar a soportar hasta el 20% de concentración en volumen.

Acidez del substrato: el pH es un factor limitante en el proceso de la fermentación ya que las levaduras se encuentran afectadas claramente por el ambiente, bien sea alcalino o ácido. Por regla general el funcionamiento de las levaduras está en un rango que va aproximadamente desde 3,5 a 5,5 pH (**Cedeño, 2015**).

Concentración de azúcares: la concentración excesiva de hidratos de carbono en forma de monosacáridos y disacáridos puede frenar la actividad bacteriana. De la misma forma la baja concentración puede frenar el proceso. Las concentraciones límite dependen del tipo de azúcar así como de la levadura responsable de la fermentación. Contacto con el aire: una intervención de oxígeno (por mínima que sea) en el proceso lo detiene por completo (es el denominado Efecto Pasteur). Esta es la razón por la que los recipientes fermentadores se cierran herméticamente.

La temperatura: el proceso de fermentación es exotérmico, y las levaduras tienen un régimen de funcionamiento en unos rangos de temperatura óptimos, se debe entender además que las levaduras son seres mesófilos. Si se expone cualquier levadura a una temperatura cercana o superior a 55 °C por un tiempo de 5 minutos se produce su muerte. La mayoría cumple su misión a temperaturas de 30 °C.

Ritmo de crecimiento de las cepas: durante la fermentación las cepas crecen en número debido a las condiciones favorables que se presentan en el medio, esto hace que se incremente la concentración de levaduras (**Ogbeide, 2011**).

1.6 Sorgo.

El sorgo se conoce con varios nombres: mijo grande y maíz de guinea en África occidental, kafir en África austral, duro en el Sudán, mtama en África oriental, iowar en la India y kaoliang en China.

1.6.1 Origen del sorgo.

El origen de este cultivo ha sido discutido a través de los años, ya que se plantea que procede del noreste de África, en la región ocupada por Etiopía, aunque se ubicó inicialmente en la India. Se introdujo en América en el siglo XVIII. Se considera que muchas especies distintas se cultivan de forma esporádica en países de América, y que los sorgos actuales son híbridos de esas introducciones o de mutantes que han aparecido. Este cultivo tiene gran importancia a escala mundial, pues está comprobado que puede sustituir cereales como el trigo y el maíz en la mayoría de los usos de estos, tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje o grano para la ceba de animales, y también en la industria. A su vez posee alto potencial de producción de granos y buenas perspectivas de contribución al desarrollo de la agricultura (**Pérez Carrillo and Saldívar, 2007**).

1.6.2 Morfología.

El sorgo tiene hábito y fisiología vegetal (metabolismo de las plantas C4) similares a los del maíz (*Zeamays*). El género *Sorghum* presenta un sistema radical profuso que le brinda una estructura de soporte muy desarrollada, lo que permite acumular gran cantidad de reservas; además le confiere una mayor capacidad de penetración y mejor persistencia en climas secos, donde la escasez de agua se mantiene por períodos prolongados; su tallo es grueso, con espinas que nacen por pares, y la altura puede oscilar de 1 a 3 m. Los nudos presentan abundantes pilosidades. Las hojas son alternas, aserradas, lanceoladas, anchas y ásperas en su margen; estas tienen la propiedad de quitinización durante los períodos secos, lo que retarda el proceso de desecación. Tiene inflorescencias en panojas; cada panícula puede contener de 400 a 8 000 granos, con un valor energético aproximado de 1,08 Mcal/kg; comparado con el maíz es un poco más rico en proteínas, pero más pobre en materia grasa deficitaria en lisina. El color del grano varía desde un blanco traslúcido hasta un pardo rojizo muy oscuro, con gradaciones de rosado, rojo, amarillo, pardo y colores intermedios; sus semillas son esféricas y oblongas, de aproximadamente 3 mm de tamaño.

1.6.3 Beneficios del sorgo.

Tolera mejor la sequía y el exceso de humedad en el suelo que la mayoría de los cereales y crece bien bajo una amplia gama de condiciones en el suelo. Responde favorablemente a la irrigación, lográndose excelentes resultados bajo riego. Requiere un mínimo de 250 mm durante su ciclo para llegar a producir grano y pueden obtenerse buenos rendimientos con 350 mm, dependiendo del ciclo del híbrido elegido y las condiciones ambientales. El consumo de Nitrógeno del cultivo y la temporaria inmovilización del mismo provocada por el aporte de rastrojo, pierde toda importancia si en la rotación suceden al sorgo especies leguminosas como soja o maní. Si después de sorgo, se siembran especies no leguminosas como trigo, maíz o girasol entre otras, deben ser adecuadamente fertilizadas. En la rotación conviene que el sorgo se ubique preferentemente después de especies leguminosas para reducir el uso de fertilizantes nitrogenados. Por ello, posturas de alfalfa o cultivos como maní o soja son excelentes antecesores (**Alemán, 2007**).

Científicos del ARS (*Asociación de Investigación de los Estados Unidos*) y en Oncativo, Córdoba, Argentina, han realizado investigaciones sobre el cultivo del sorgo y su incorporación en alimentos humanos, como cereales de desayuno, pastas, etc.,

demostrándose que el mismo ofrece la ventaja de no contener gluten por lo que no presenta problemas para personas con la intolerancia celíaca, y tienen algunas variedades fenoles y taninos, que son sustancias que previenen de la formación de radicales libres y la aparición del cáncer, así como su elevado contenido de fibras. Según los estudios realizados, el sorgo podría ser panificable, a pesar de su ausencia de gluten, y también usarse en galletas apta para celíacos. En la Tabla 1.1 se reportan las composiciones de algunos cereales empleados como alimentos (Rodríguez, 2005).

Tabla 1.1 Composición de algunos cereales.

Contenidos	Trigo	Maíz	Cebada	Avena	Sorgo
Humedad %	11,1	15,0	10,6	9,8	11,17
Almidón %	68,6	67,0	66,0	57,1	69,3
Proteína %	14,3	10,2	13,0	12,0	10,4
Grasa %	1,9	4,3	2,1	5,1	3,4
Fibra %	3,4	2,3	5,6	12,4	2,2
Cenizas %	1,8	1,2	2,7	3,6	2,0
<i>Materias nitrogenadas</i>	1,7	5,0	1,6	0,4	1,7
<i>Celulosa</i>	2,0	3,6	2,0	2,0	2,0

En la tabla anterior se puede observar que, la composición del sorgo se encuentra en un rango asequible, comparado con los demás cereales y en especial con la cebada y el trigo que son los cereales que se tratan de sustituir, para el mejoramiento de la dieta de los enfermos celíacos.

1.7 Problemas asociados con el uso de malta de sorgo y sorgo como adjunto cervecero en la producción de esta bebida.

a) durante el malteo: nivel menor de enzimas amilolíticas y proteolíticas en la etapa posterior de maceración o hidrólisis de los mostos; pérdidas de entre el 20 y 25% de materia del sorgo en comparación con 7% en la cebada; temperatura de germinación de 25°C alta en comparación con la de la cebada de 16°C que permite el desarrollo de hongos como el *Aspergillus flavus* en granos de pobre calidad microbiológica.

b) durante la producción de los mostos: la temperatura de gelatinización del almidón de sorgo es ligeramente más alta que la de la cebada o maíz, lo que se traduce en problemas de viscosidad durante la etapa de gelatinización; menor hidrólisis del almidón y proteína, por tanto, menor producción de azúcares reductores y amino nitrógeno libre indispensables para una adecuada fermentación. Además algunos sorgos, como los cafés o marrones, tienen alto contenido de taninos o polifenoles, compuestos que impiden una adecuada acción enzimática. Se ha documentado que la utilización de fracciones refinadas de sorgo ocasionan problemas por la obstrucción de los poros de los filtros causada por las adición de fracciones finas (v.gr. harina resultante de la molienda del sorgo para obtener gríts) por lo tanto se incrementa el tiempo de filtración de los mostos y la pobre formación del lecho filtrante ya que el sorgo después de la cosecha pierde las glumas que ayudan a formar esta cama filtrante.

c) durante la fermentación: menor crecimiento de la levadura, menor desarrollo del sabor y capacidad espumante (**Ortega, 2001**).

1.8 Enfermedad Celíaca.

La enfermedad celíaca, o enteropatía sensible al gluten, es un desorden intestinal con una etiología multifactorial donde se desarrolla un síndrome de mal absorción, entre otras complicaciones, producido por el daño en las vellosidades intestinales del intestino delgado cuando se ingiere gluten. Las personas con enfermedad celíaca tienen un trastorno que hace que su cuerpo reaccione al gluten. Cuando estas personas comen gluten, la reacción del sistema inmune a la proteína erosiona y destruye gradualmente las vellosidades del intestino delgado. Cuando se dañan las vellosidades, el cuerpo no puede procesar las vitaminas, los minerales y otros nutrientes que necesita para mantenerse saludable. Por lo tanto las personas con enfermedad celíaca corren el riesgo de sufrir desnutrición y pueden desarrollar anemia (disminución de la cantidad de glóbulos rojos debido a la falta de hierro) u osteoporosis (huesos quebradizos debido a la falta de calcio).

En Argentina en el año 2005 se estimó que de cada 160 personas, una padecía de enfermedad celíaca. Estas personas no pueden ingerir ningún producto derivado del Trigo, Avena, Cebada y Centeno ya que el gluten es la proteína que los afecta. La solución es reemplazar la Cebada por otro producto apto para estos enfermos (**Pérez, 2016**).

1.8.1 Origen de la enfermedad celíaca.

Algunos autores describen históricamente la enfermedad “celíaca”, como se detalla a continuación:

- Siglo II a.C: primera descripción de la enfermedad por parte de un contemporáneo de Galeno, Aretaeus de Capadocia. En esta época a las personas que la padecían se les conocía con la palabra *koliacos*, de la cual deriva celíacos, y que significaba “aquellos que sufren del intestino”.
- 1856: Francis Adams traduce y edita los trabajos de Aretaeus.
- 1908: Herter (pediatra) escribe un libro sobre la enfermedad en niños. La afección fue conocida como enfermedad de Gee-Herter.
- 1950: Dicke demostró como los niños celíacos mejoraban cuando se excluía de sus dietas el trigo, el centeno y las harinas de avena. Otros investigadores descubren que el gluten de estos alimentos era su parte dañina. A partir de esta fecha el tratamiento de los pacientes celíacos se basa precisamente en la dieta sin gluten, proteína presente en los compuestos nombrados anteriormente.
- 1950: Paulley describe una anomalía de la mucosa del intestino delgado en un paciente celíaco.

1.8.2 Tratamiento de la enfermedad celíaca.

La dieta estricta sin gluten ha constituido la esencia del tratamiento de esta enfermedad, además de ser segura y eficiente, restablece inequívocamente la integridad estructural al intestino dañado. Sin embargo, la práctica clínica ha demostrado que la adherencia terapéutica no solamente es complicada, sino que repercute negativamente desde el punto de vista psíquico y social, por lo difícil que resulta en los hábitos alimentarios rechazar obligadamente el gluten, constituyente básico en una gran variedad de

productos cotidianamente consumidos, como el pan, las galletas, las pastas alimenticias y la mayoría de las golosinas, entre otros **(Maoura and Pourquie, 2009)**.

Actualmente se comercializan en Cuba alimentos de repostería como panquecitos, magdalenas, pizzas, biscochos, panetelas, pasteles, panes; una muestra de ello es la panadería La Antigua Chiquita, en la capital del país, para enfermos celíacos; una población que no rebasa hoy en todo el país las 800 personas, según las estimaciones realizadas en el mes de marzo del 2016 **(Piñeda, 2016)**.

Internacionalmente se están realizando estudios en la búsqueda de nuevos alimentos que les permita el necesario cumplimiento de la dieta de estos enfermos, en tal sentido se lleva a cabo la elaboración de distintos tipos de pan, tostadas y repostería a través de la harina de sorgo debido a que este cereal no contiene gluten. Existe un recetario de productos alimenticios elaborados a partir de sorgo confeccionado en el Centro de Investigaciones Agropecuarias de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

CAPÍTULO 2: Desarrollo experimental.

El presente capítulo se basa en el estudio de la etapa de maceración y de fermentación alcohólica para la obtención de cerveza, empleando integralmente el grano de sorgo (malta de sorgo y jarabe dextrinizado de sorgo como adjunto), con el propósito de obtener una cerveza libre de gluten para enfermos celiacos y analizar las mejores condiciones de operación de cada una de estas etapas, tomando como referencia estudios precedentes realizados sobre el tema, sustituyendo el azúcar de caña empleado en la cervecería como adjunto, por un jarabe dextrinizado.

2.1 Obtención de cerveza empleando integralmente el grano de sorgo.

El proceso de elaboración de la cerveza constó de tres etapas:

1. Proceso de malteado del grano.
2. Elaboración del jarabe dextrinizado, empleado como adjunto.
3. Elaboración de la cerveza.

2.1.1 Proceso de malteado.

El malteado posee gran importancia, pues como ya se había expuesto anteriormente es en esta etapa donde se logran obtener las enzimas α -amilasa y β -amilasa que permiten convertir el almidón del sorgo en el disacárido y el monosacárido correspondiente, es decir, maltosa y glucosa, respectivamente.

En la realización del malteado se utilizó el sorgo blanco UDG-110, empleado en investigaciones anteriores, comprado en la Empresa de Semillas de Santa Clara, Cuba.

2.1.1.1 Etapas por las que está constituido el proceso (Anexo 1).

1. Clasificación o selección del grano.
2. Remojo.
3. Germinación.
4. Secado.

2.1.1.1.1 Clasificación del grano.

Se realiza con el objetivo de hacer una limpieza y selección del grano donde se desechan los que han sido fracturados durante el proceso de recolección o cosecha. Se pasó por un tamiz con el fin de separar el polvo y otras impurezas que contenía la muestra a maltear,

seguidamente se escogen los granos para eliminar los dañados. En esta etapa se procesaron 3930 g, luego se determinó el % de merma, obteniéndose los siguientes resultados:

Muestra

Peso inicial = 3930 g

Peso limpio = 3550 g

Peso sucio = 380 g

$$\% Merma = \frac{Peso_{Sucio}}{Peso_{inicial}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$\% Merma = 9.6$$

2.1.1.1.2 Etapa de remojo.

Se tomaron los 3550 g de sorgo, clasificados y limpios, luego se añadieron en un recipiente adecuado. Se añadió la concentración de NaOH requerida hasta un nivel superior al de los granos. (Nelles and Taylor, 2002) y (Lefyedi and Taylor, 2006) mostraron un método químico que no afecta negativamente al grano de sorgo y consiste en la adición de una solución alcalina (0.1-0.5% NaOH o CaOH₂). [(Okolo and Ezeogu, 1996a); (Okungbowa et al., 2002)]. Estos autores recomendaron la adición de una solución alcalina al 0,1 % para mejorar el poder diastático de la malta, parámetro clave en la calidad del proceso de malteado. En el presente trabajo se partió de los mejores resultados obtenidos por (Carvajal, 2014) y (Díaz, 2014) quienes analizaron la influencia de la concentración de NaOH tiempo de remojo y de germinación para obtener los valores óptimos en el estudio los cuales fueron concentración de hidróxido de sodio al 0,1 % p/p, tiempo de remojo de 12 horas y tiempo de germinación de 72 horas.

Se cambió la solución y aireó cada seis horas, evitando así que ésta adquiriera un olor desagradable, debido a la actividad de las bacterias contenidas en el grano; de esta forma se logran disolver las sustancias que pueden ser perjudiciales para la etapa de germinación. El remojo se efectuó durante 12 horas.

Al terminar el remojo se determinó la humedad alcanzada por los granos en la muestra a tratar, mediante desecación en una estufa a 100°C siguiendo la técnica operatoria para la determinación de la humedad (Anexo 2).

$$\% \text{ Humedad} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i - P_c} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde

Pi: Peso inicial

Pf: Peso final

Pc: Peso de la cápsula utilizada

La humedad alcanzada en el remojo fue de 34,4%, algo inferior a los trabajos reportados. A medida que transcurría el tiempo de remojo el grano iba creciendo, producto de la absorción del agua en el seno del mismo, lo cual provocó la hinchazón del grano (elongación de la semilla).

2.1.1.1.3 Etapa de germinación.

Después del remojo los granos se colocaron en tres bandejas metálicas cubiertas con paños húmedos para airearlos en una estufa de tiro inducido a 30°C con el objetivo de mantener la temperatura constante, fueron rociados dos veces al día para mantener la humedad alcanzada en la etapa anterior. En este tiempo pudo observarse el brote de las raicillas o plumillas. El tiempo que se tomó para llevar a cabo el estudio fue de 72 horas. Los resultados alcanzados se muestran en la tabla 2.1 y fueron obtenidos mediante la ecuación 2.3 tomando muestras aleatoriamente.

$$\% Ger. = \frac{\text{Granos germinados}}{\text{Granos totales}} * 100 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Tabla 2.1 Valores porcentuales de los granos germinados.

Total de granos	Granos germinados	% Germinación
102	56	54,90
84	43	51,19
56	29	51,78
123	61	49,59
85	44	51,76
74	38	51,35
52	26	50
81	39	48,14
56	26	46,42
46	27	58,69
	Promedio %	51,38

El rendimiento de la germinación fue deficiente, en comparación con los valores referenciados por los autores señalados anteriormente y por **(González, 2015)** quien malteó el mismo tipo de sorgo, con los valores óptimos obtenidos por Carvajal y Díaz obteniendo valores de granos germinados de 86 % para malta clara y 88.6 % para malta caramelo, en lo que puede haber influido la humedad alcanzada, así como la mala calidad del grano de sorgo empleado, se piensa que por las condiciones de almacenamiento, calidad en la recolección, entre otras causas, aunque fue comprado recientemente.

2.1.1.1.4 Etapa de secado.

El secado es un proceso difusivo complejo, cuya velocidad se define por la velocidad de difusión de la humedad desde el interior del sólido a secar hacia el medio ambiente, donde hay transferencia de calor y masa. La humedad se difunde a través del sólido como líquido o vapor de la superficie del mismo hasta la corriente gaseosa (aire).

Se realizó el secado de la malta para convertirla en malta clara que es la empleada para la cerveza, para ello se utilizaron tres bandejas metálicas en las cuales se colocó el sorgo germinado con un espesor de 1.7 cm en una estufa de tiro de aire inducido, con el fin de alcanzar una humedad en el grano entre el 3-5%.

Se comienza el secado con la temperatura a 60 °C con el objetivo de garantizar que no se destruyeran las enzimas y así evitar la vitrificación del grano, hasta que la malta alcanza una humedad menor de 5%.

En la tabla 2.2 y figura se presentan la cantidad de muestras tomadas en el tiempo y el porcentaje de humedad para cada una de estas en dicho proceso. Las muestras fueron tomadas cada 30 minutos donde se observa un adecuado comportamiento de la humedad. Como se aprecia el tiempo total de esta etapa del malteado, se comportó de forma similar al secado cuando no se ha empleado agentes químicos en dicho proceso.

2.1.1.1.5 Tamizado y pulido.

Luego del secado se retiran las raicillas que se producen durante el malteado con el propósito de no perjudicar la calidad del producto final. Debe hacerse cuando termine el secado, debido a que las raicillas son fuertemente higroscópicas y es más fácil retirarlas cuando están secas.

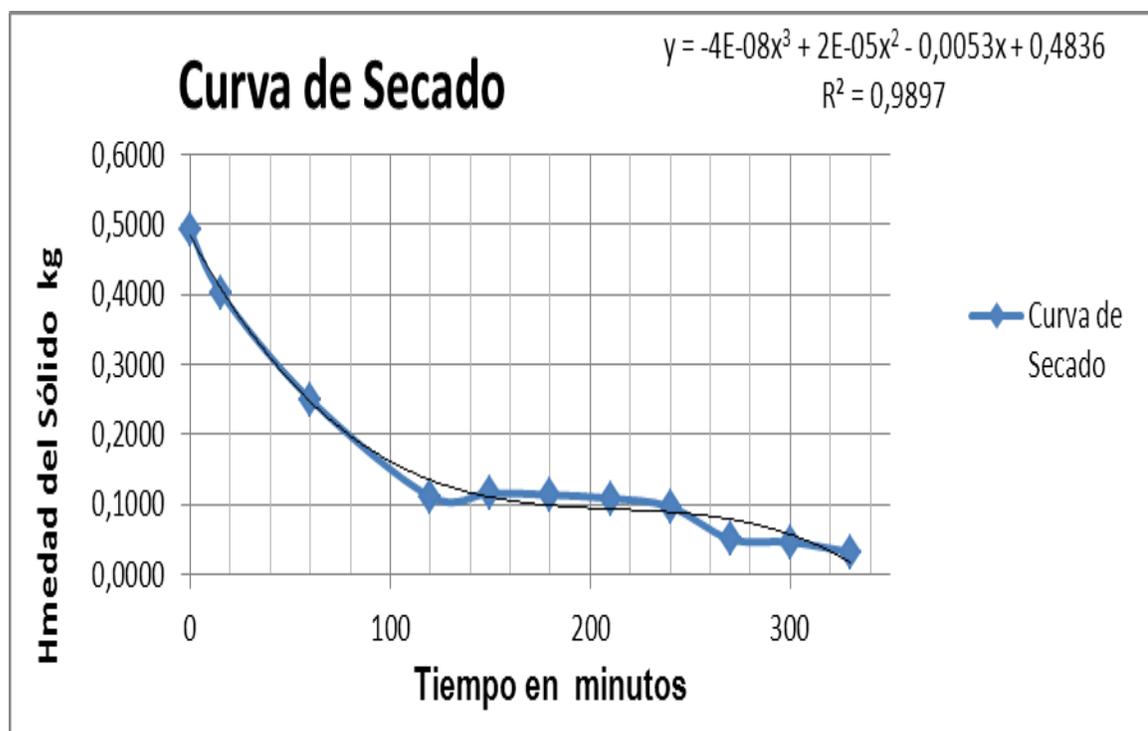


Fig. 2.1 Valores de la curva de secado de la malta

Tabla 2.2 Comportamiento de la humedad en el secado.

Tiempo(min)	X (%)	Humedad (base seca) Kg agua/Kg s.s
0	32,95	0,4914
15	2,7	0,4025
60	20	0,2500
120	10	0,1111
150	10,4	0,1161
180	10,2	0,1136
210	9,8	0,1086
240	8,8	0,0965
270	4,8	0,0504
300	4,4	0,0460
330	3,1	0,0320

2.1.2 Propiedades determinadas a la malta de sorgo.

2.1.2.1 Pérdidas del malteado.

Las pérdidas en el malteado vienen evidenciadas por el porcentaje de rendimiento de los granos de sorgo, esto depende mucho de la calidad que éste presente. Para su determinación se utilizó la ecuación que se muestra a continuación.

$$\% \text{ Pérd} = \frac{P_g - P_{ms}}{P_g} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde

P_g: peso inicial de la muestra.

P_{ms}: peso de la malta seca

Se obtuvo un valor de 20,36 % de pérdidas aunque para el malteado de los granos de de sorgo se reportan en la bibliografía valores hasta 19 %. Aquí es necesario señalar que el sorgo empleado fue de muy mala calidad, que es el que se expende en la Empresa de semillas de Santa Clara.

2.1.2.2 Contenido de extracto.

Fue realizado mediante el método reflejado en (Pelembé, 2004), donde se determina la gravedad específica del extracto de malta por métodos gravimétricos a 20°C y la ecuación 2.5. Con la gravedad específica se calcula el contenido de extracto como un porcentaje en peso por la tabla Plato (Anexo 3 y 4).

$$S = 0,99913 * \frac{C-A}{B-A} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde

A: peso picnómetro vacío

B: peso picnómetro con agua destilada.

C: peso picnómetro con la solución.

Se obtuvo un valor de 1,977g/100 de solución, inferior a resultados obtenidos anteriormente debido a la mala transformación del grano en la germinación (51.38 %).

2.1.3 Caracterización de la materia prima.

La malta fue caracterizada en el Centro de Producciones Agropecuarias (CIAP) de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, los resultados se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Caracterización de la materia prima empleada en los experimentos.

Grano	% PB	Minerales %				
		Ca	Mg	Fe	Cu	Zn
Sorgo	12,5	0,015	0,171	0,0042	0,00044	0,0025
Malta de Sorgo	13,18	0,0728	0,0306	0,0138	0,00094	0,00445

2.1.4 Obtención de jarabes enzimáticos empleados como adjuntos.

Para la obtención de los jarabes, se prepara una suspensión de sorgo-agua de acuerdo a los resultados obtenidos en trabajos anteriores (Nieblas 2015, Cedeño 2015, Rodríguez et al. 2015) a una concentración de 20% p/p, inferiores a las empleadas por estos autores, por la disposición de materia prima. Se calienta dicha suspensión en un termostato marca U15-MLW empleando para ello un agitador mecánico marca RW16 a 550 rpm. Ya lista la mezcla, se ajusta el pH a 6,5 debido a que el rango de acción de la enzima Termamyl es de 5,5 a 7 (**Novozymes, 2007**). Posteriormente se calienta a 85°C que es la temperatura de gelatinización de esta suspensión y se añade la enzima a una concentración de 0.16 % de acuerdo a trabajos realizados anteriormente con esta enzima, para comenzar de esta manera la licuefacción. La enzima se deja actuar durante una hora a una temperatura de 90°C. Luego de pasado el tiempo establecido, se deja enfriar la suspensión hasta temperatura ambiente y se filtra el jarabe obtenido con carbón activado granular para remover color. Se ajusta el pH a 4.5 empleando HCL al 1%, con el objetivo de eliminar la acción de la enzima. Se esterilizan los jarabes obtenidos en la autoclave marca LDZM-80 KCS, durante 20 minutos, a una temperatura de 121° C. Los jarabes obtenidos en tres momentos diferentes alcanzaron valores de Brix de 13.2 % y ART de 67,22 g/L como promedio.

2.1.5 Elaboración de cerveza.

Este proceso consta de varias etapas a su vez: molienda de la malta, maceración de la malta, cocinado o hervidura del mosto macerado, enfriamiento, adición de los nutrientes, aireación, fermentación y filtración.

2.1.5.1 Análisis experimental.

Para el estudio de la obtención de cerveza se aplicó un diseño de experimentos del tipo 2^{k-1} , siendo $k=4$, resultando diez experimentos con dos puntos centrales de los cuales se replicaron cuatro. Se trabajaron cuatro variables, con dos niveles, donde X_1 es la relación Malta/Líquido (ML) de acuerdo a la relación empleada en la Carta Tecnológica de la Cervecería de Manacas (Anexos 5 y 6); X_2 es la concentración de enzima Termamyl (α Amilasa) (CE) tomados en un rango de acuerdo a valores reportados en (Vicente, 2013), que trabaja con enzimas; la inclusión de esta variable se justifica por la mala calidad de la malta producida, X_3 la relación Adjunto/Malta, X_4 la concentración de inóculo (CI). Se tomaron como variables respuesta el consumo de Azúcares Reductores (ART), el grado alcohólico del producto, la productividad, el rendimiento y el tiempo de fermentación. En

las tablas 2.4 y 2.5 se muestran las variables independientes con los niveles seleccionados y la matriz experimental respectivamente.

Tabla 2.4 Variables independientes y sus niveles.

Variables	Niveles
Rel. Malta/Líquido (X_1)	96-133 g/L
Concentración de enzima (X_2)	0.05-0.08 %
Rel. Adjunto/Malta (X_3)	30/70-50/50
Concentración de inóculo (X_4)	0.5-1 g/L

Tabla 2.5 Matriz experimental.

Experimentos	X_1	X_2	X_3	X_4
1	+	+	-	-
2	-	+	-	+
3	0	0	0	0
4	+	-	-	+
5	-	+	+	-
6	+	+	+	+
7	-	-	-	-
8	0	0	0	0
9	+	-	+	-
10	-	-	+	+

2.1.5.2 Determinaciones experimentales de las variables medidas.

2.1.5.2.1 Azúcares reductores.

Los Azúcares Reductores fueron determinados en muestras duplicadas de filtrados con el Método de Bernfeld, utilizando el Ácido 3,5-Dinitro salicílico. Este se basa en la relación según la ley de Lamber-Beer, siendo la absorbancia medida en un espectrofotocolorímetro a 540 nm proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra (Anexo 7).

2.1.5.2.2 Grados Brix.

Al atravesar un rayo de luz dos medios diferentes, el primero experimenta una variación en su trayectoria en un cierto ángulo, llamándosele a esta desviación refracción. El índice

de refracción varía con la temperatura, con la longitud de onda y con la concentración de sólidos solubles presentes, esta nos da una medida de los sólidos solubles en sólidos totales o lo que es lo mismo los grados Brix. Para la determinación del Brix se utiliza un refractómetro (Anexo 8).

2.1.5.2.3 Grado alcohólico.

El grado alcohólico da la medida de cuanto etanol presentan las cervezas al final de la fermentación, se determina mediante el método picnométrico que se basa en el pesar el destilado obtenido después de hacer ebullición y pasar los vapores a través de un condensador (Anexo 9 y 10).

2.1.5.3 Maceración.

En la etapa de maceración se utilizó un beaker de 5 L como reactor, colocado en un termostato (MARCA U15 MLW) con el propósito de regular la temperatura, acoplado a un agitador mecánico (MARCA IKA RW-16), logrando la homogenización de la mezcla. Se comienza un proceso de elevación y mantenimiento de la temperatura escalonadamente. Se realiza el ajuste del pH de la mezcla (ver Anexo 9) en un rango de 5.5 a 7 en un pHmetro (MARCA HANNA 213). Al alcanzar los 38 °C, se agregó el grano de sorgo, esta temperatura se mantiene durante 40 minutos. Luego se aumenta la temperatura a un rango de 50- 55 °C, se mantiene también durante 40 minutos. Una vez transcurrido este tiempo se eleva la temperatura a 63 °C y se conserva por 40 minutos y posteriormente a 71 °C donde se le adiciona la enzima Termamyl (α Amilasa) y se sigue cocinando durante 60 minutos. Este proceso se realiza para lograr la sacarificación de los almidones, es decir la conversión de los almidones en azúcares fermentables. A diferencia de Vicente la malta se procesa como en la fábrica, escalando temperaturas en el tiempo para ver el efecto de la malta también se tomaron tiempos superiores en cada etapa con respecto a la cebada, pues se reportan que para sorgo este proceso es más lento, en el último período es que se agrega la enzima exógena Termamyl.

2.1.5.4 Extracción del líquido y lavado.

En este punto comienza la separación del mosto que se convierte en cerveza, del afrecho. Con un colador grande, se coloca toda la mezcla, guardando el líquido en un recipiente y el grano en otro. Cuando se ha colado todo, se vuelve el grano y se le agrega más agua caliente, esta vez a unos 78°C y se revuelve para que continúen disolviéndose los

azúcares contenidos en dicha mezcla. Luego de unos minutos se repite el paso anterior, colado del grano.

Tabla 2.6 Caracterización de la levadura empleada.

Valor Nutritivo por 100 g	Cantidad
Calorías	390 kcal
Grasas	6 g
Saturados	2 g
Colesterol	0 g
Sodio	0,075 g
Calcio	0,045 g
Hierro	0,005 g
Carbohidratos	33 g
Fibra	27 g
Azúcares	0 g
Proteínas	50 g
Vitamina A	0 g
Vitamina C	0,3 g

2.1.5.5 Adición de los nutrientes.

Se enfría el mosto y se estabiliza el pH de la solución en un rango de 4,8-5,2 que es en el que trabaja la levadura empleada. Se añade 1g/L de sulfato de amonio y fosfato de amonio dibásico empleados como nutrientes. Se añade la dosis de levadura según el diseño experimental. La levadura empleada fue la *Saccharomyces cerevisiae* liofilizada. Sus características se muestran en la tabla 2.6 mostrada anteriormente.

2.1.5.6 Aireación.

La muestra se introduce en un frasco de cristal (fermentador) de dos litros de capacidad este es conectado a una Bomba Peristáltica, donde se airea con el propósito de que el microorganismo adquiera una reserva de Oxígeno que le permita desarrollarse y crecer,

esto se realiza porque no existe una etapa de pre fermentación, esta operación se realiza durante 30 minutos.

2.1.5.7 Filtración.

Primeramente se detiene el proceso de fermentación, siendo necesario calentar el fermento en una hornilla (*MARCA IKA RET*) a temperaturas superiores a los 50°C para detener la actividad de la levadura. Luego la muestra es filtrada, utilizando para ello embudos de vidrio y papel de filtro, cayendo el líquido filtrado en erlenmeyers de 500 ml obteniendo así la cerveza.

2.2 Resultados obtenidos en cada etapa de elaboración de la cerveza.

2.2.1 Maceración.

En la tabla 2.8 y figura 2.2 se muestra la relación Temperatura-tiempo en el desdoblamiento de las enzimas de la malta a los distintos cambios de temperatura y tiempos, descritos anteriormente. Aquí se aprecia que la velocidad del cambio de temperatura están entre 0,8 -1,3 °C/min., en el rango de lo reportado para la malta de cebada cervecera de 1,0 °C/min.

Tabla 2.7 Tiempo y temperaturas alcanzadas.

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0	25
10	38
55	38
65	55
105	55
120	63
160	63
168	71
228	71

Tabla 2.8 Valores de Brix obtenidos para cada experimento durante la maceración.

Temp. (°C)	Tiempo (min)	Experimentos									
		E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	E.6	E.7	E.8	E.9	E.10
38	40	1,2	0,1	1,1	1,5	0,1	1,2	0,4	1,1	1,1	0,4
55	40	2	1,5	1,9	2,5	1,5	2	0,9	1,9	2	0,9
63	40	2,6	2	2,1	3	2	2,6	1,1	2,1	2,2	1,1
71	30	3,5	4	3,2	3,9	4	3,5	2,2	3,2	5	2,2
71	30	5,5	5,1	4,6	4,1	5,1	5,5	3,1	4,6	5,8	3,1

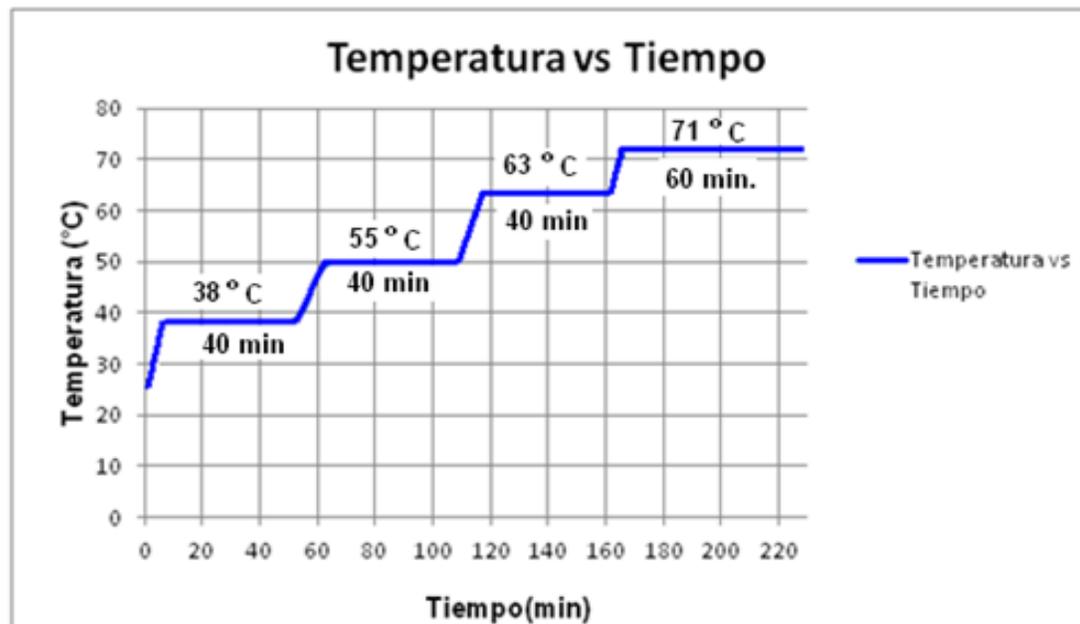


Fig. 2.2 Comportamiento de la Temperatura con el Tiempo en la maceración.

Para el experimento 7 y 10 se realiza un estudio del comportamiento de los grados Brix y los ART contra el tiempo, ya que no fue posible determinar los ART a todos los experimentos en el transcurso de la conversión por escasez de reactivos, pero si los Brix, dichos resultados son mostrados en la figura 2.3 y 2.4 respectivamente y los Brix de cada experimento en el Anexo11.

Tabla 2.9. Variación de los Brix y los ART durante la maceración.

Temperatura(°C)	Tiempo(min)	ART(g/l)	Brix (%)
38	40	6,48	0,5
55	80	11,49	1
63	120	28,55	2
71	150	31,12	3,1
71	180	32,88	4,2



Fig. 2.3 Comportamiento de los Grados Brix con el tiempo.

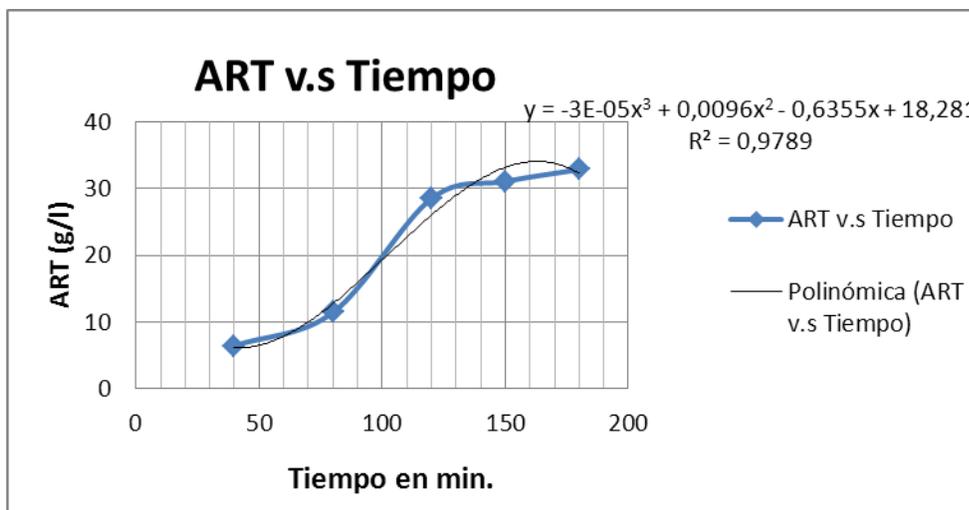


Fig. 2.4 Comportamiento de los ART con el tiempo.

Como puede apreciarse en las figuras 2.3 y 2.4 a medida que transcurre el tiempo de maceración tanto los grados Brix como los ART tienden a aumentar, resultado de la solubilidad y conversión de los almidones, estos valores son muy bajos comparados con los obtenidos por González 2015, debido a la calidad de la malta obtenida. Estas relaciones responden a polinomios de segundo orden al igual que la relación entre estas dos variables, figura 2.5.

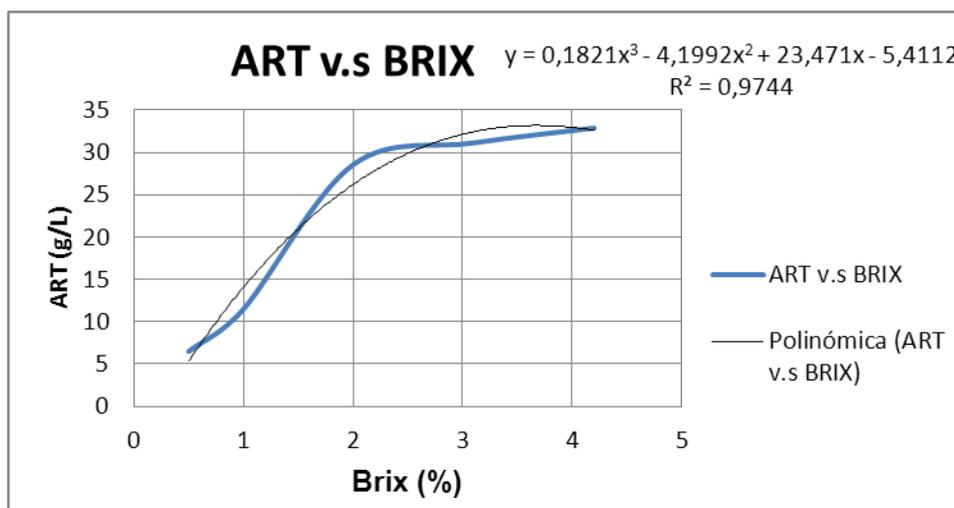


Fig. 2.5 Variación de los ART con los Brix.

Como no fue posible determinar los ART a todos los experimentos como fue argumentado anteriormente reportados en la tabla 2.11 y 2.12 (réplicas realizadas), por la ecuación ajustada, obtenida de la figura 2.5, se estimaron con los Brix alcanzados en cada experimento, los valores de ART mostrados en la figura 2.6.

Tabla 2.10. Valores de ART estimados y reales durante la maceración.

Muestras	ART estimados (g/L)	ART reales (g/L)
1	26,95	28,00
2	29,22	25,16
3	31,42	22,32
4	32,78	19,75
5	29,22	25,16
6	26,95	28,00
7	32,58	32,88
8	31,42	22,32
9	24,98	31,79
10	32,58	32,88

Tabla 2.11. Valores de los experimentos replicados

Muestras	ART estimados (g/L)	ART reales (g/L)
1	29,95	32,01
6	30,22	31,16
7	28,98	29,98
10	31,52	30,69

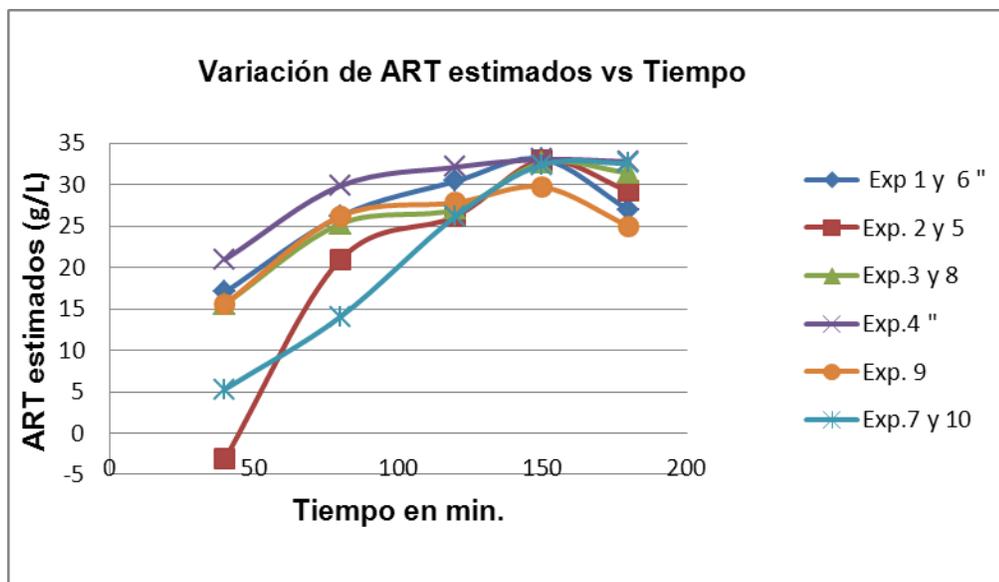


Fig. 2.6 Variación de los ART con los Brix.

La figura 2.6 muestra el cambio de los ART estimados con el tiempo a los diferentes rangos de temperatura trabajados (reportados en la tabla 2.9.) donde se aprecia el aumento de los azúcares con el tiempo, en el cual se alcanzan los mejores resultados para el experimento cuatro con la menor concentración de enzima (0,05%) pero la mayor relación Sólido/Líquido seguido del uno y el seis con igual relación pero con la mayor concentración de enzima (0,08%), lo que parece indicar que la relación Malta/solución es la variable de mayor influencia en la maceración. Aunque los mayores brix obtenidos fueron para los experimentos 9, 1, 6, 2 y 5, por el ajuste polinómico de la curva, no son los de mayores ART.

2.2.1.1 Otros experimentos realizados.

Se realizó un estudio en la maceración fuera del diseño experimental, prolongando el tiempo de acción de la enzima exógena alfa amilasa hasta un período de dos horas con los mayores niveles de las variables que influyen en esta etapa (133 g/L de malta y 0.08 % p/p la concentración de enzima) arrojando los resultados reportados en la tabla 2.12.

Tabla 2.12 Comportamiento de los Brix y los ART

Temperatura(°C)	Tiempo(min)	Brix(%)	ART(g/l)
38	40	0,6	12,84
50	80	0,9	13,52
63	120	2,5	30,31
71	150	3,3	32,88
71	240	6,5	56,30

La figura 2.7 evidencia la comparación de la variable medida Brix para este experimento tomado como el número 11 con los resultados revelados anteriormente en la tabla 2.8.

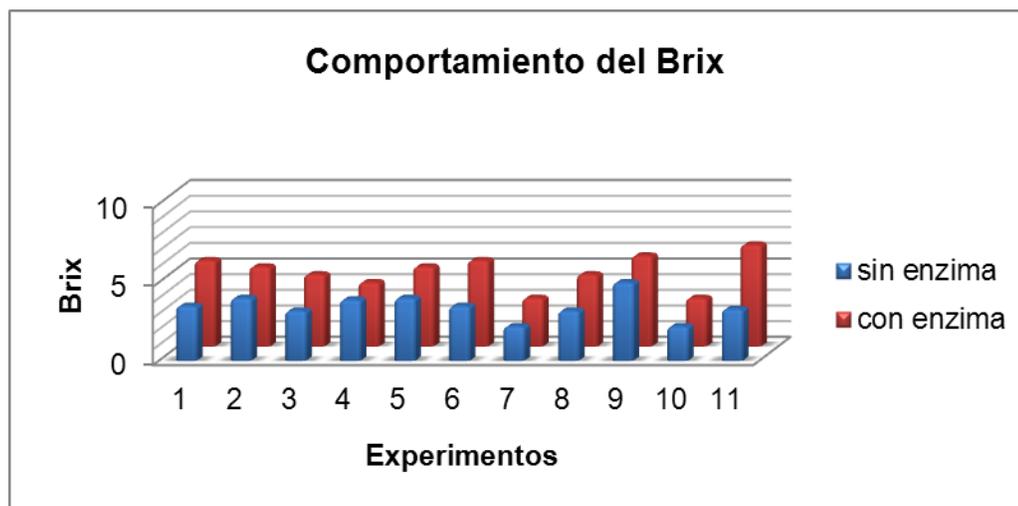


Fig. 2.7 Variación de los Grados Brix en el último intervalo de tiempo durante la maceración.

De acuerdo al comportamiento del Brix medido en los últimos intervalos de tiempo (especificados en la tabla 2.8) a 63 °C y a 71 °C donde se le añade la enzima Termamyl, se obtiene el mejor valor para el experimento once equivalente a 6,5% con dos horas de sacarificación; obteniéndose una diferencia de 3,2 % lo que indica el efecto positivo de la concentración y el tiempo de acción de dicha enzima. Le siguen el experimento nueve y seis, con 5,8 y 5,6% respectivamente, donde se emplean la mayor relación sólido líquido acorde a la matriz experimental. Para las experiencias cuatro, siete y diez no se aprecian cambios significativos entre trabajar sin enzima y trabajar con la mínima concentración empleada de 0,05%; en comparación con los restantes se nota una variación apreciable

cuando se emplea la mayor concentración de enzima para iguales condiciones de tiempo de sacarificación.

Es preciso resaltar que este parámetro no es específico de almidones convertidos a azúcares en el proceso, pues las muestras pueden contener almidones solubles que no fueron convertidos, lo cual se percibe mejor con la medida de los azúcares reductores.

2.2.2 Fermentación.

Tabla 2.13. Comportamiento de las variables medidas en la etapa de fermentación.

Exp.	Brix (%)		ART (g/l)		ART Consumido (%)	T.Ferm (h)	Alcoh (°GL)	Rend. $\frac{g_{alc}}{g_{sust}}$ (%)	Prod. g/L*h
	Inicial	Final	Inicial	Final					
1	8	6,1	55,9	24,35	56,43	44	3,07	43,0	0,55
2	10,5	7,4	49,53	29,23	40,99	53	2,72	43,6	0,41
3	7,5	4,8	48,31	22,19	54,07	39	2,6	53,0	0,67
4	9	5,5	36,94	22,05	40,3	28	2,37	50,0	0,67
5	8	5,9	36,54	20,83	42,97	69	2,72	59,0	0,31
6	10,5	7,7	58,74	27,6	53	38	4,88	65,0	1,02
7	5,8	5,3	27,67	23,27	15,91	63	1,00	44,0	0,19
8	9,5	8,1	47,91	32,21	32,78	23	2,02	33,0	0,7
9	11,1	7,2	57,52	34,91	39,3	28	3,42	46,0	0,94
10	7,2	6,9	31,12	27,47	11,75	63	1,54	42,0	0,21
R.1	7,5	5,6	53,5	23,52	56,04	31	2,89	45,42	0,78
R.6	10,9	8,1	62,1	29,5	52,49	35	4,05	62,32	11,06
R.7	4,9	3,8	25,54	22,76	47,77	58	0,89	47,77	0,21
R.10	7	6,5	29,27	26,54	9,32	54	1,34	45,44	0,24

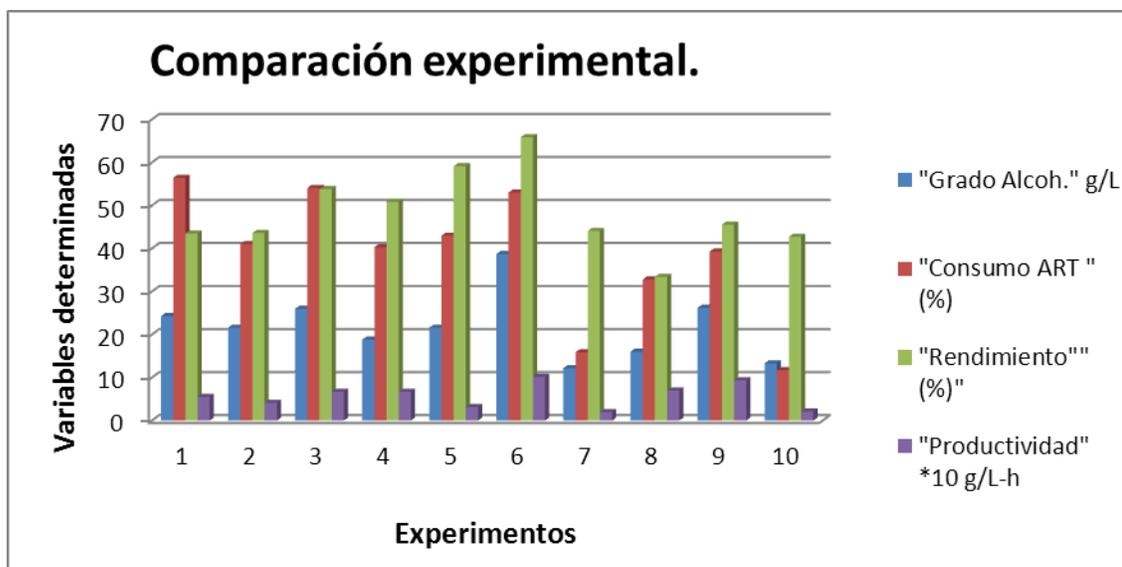


Fig. 2.8 Comportamiento del grado alcohólico, consumo de ART, rendimiento y productividad para cada experimento.

La figura 2.8 establece una comparación entre todas las experiencias realizadas en cuanto al grado alcohólico, consumo de ART, rendimiento y productividad, como variables respuesta, donde se evidencian los mejores resultados para el experimento seis para el cual se trabajó con los mayores niveles de las variables independientes, le continúan el cinco, tres y nueve.

2.3 Análisis estadístico del proceso de elaboración de cerveza.

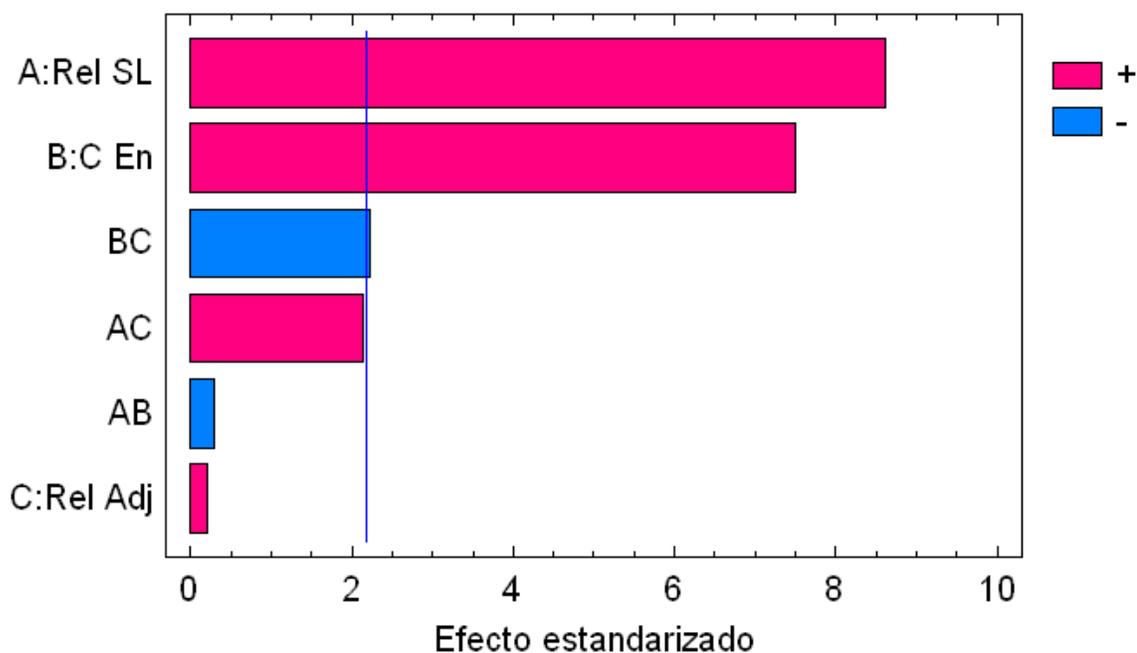
Se analiza el diseño de experimentos en el Software Statgraphics Centurion XV con la correlación entre las cuatro variables independientes sobre las variables respuestas: consumo de ART, grado alcohólico, rendimiento, productividad y tiempo de fermentación. Es necesario destacar que en los resultados del programa para este tipo de diseño 2^{k-1} no arrojó ningún análisis para el Diagrama de Pareto, ni de Superficie de respuesta, ni el Gráfico de Efectos Principales; alegaba que existía una dependencia lineal entre las variables, sin embargo el modelo explicaba la significación de las variables, razón por la cual se elimina la variable independiente no significativa (concentración de inóculo). Al analizar el diseño como un 2^3 se obtienen los modelos y los diagramas correspondientes mostrados en las figuras 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12 para cada variable respuesta.

2.3.1 Consumo de ART.

Al considerar la influencia de las variables independientes en el consumo de ART, se obtiene la siguiente ecuación del modelo, que se ajusta para un valor de $R^2 = 92,13\%$

$$\text{Cons ART} = 19,0875 + 7,445 * \text{Rel SL} + 6,49125 * \text{C En} + 0,1825 * \text{Rel Adj} - 0,25 * \text{RelSL} * \text{C En} + 1,85375 * \text{Rel SL} * \text{Rel Adj} - 1,925 * \text{C En} * \text{Rel Adj}.$$

Diagrama de Pareto Estandarizada para Cons ART



Gráfica de Efectos Principales para Cons ART

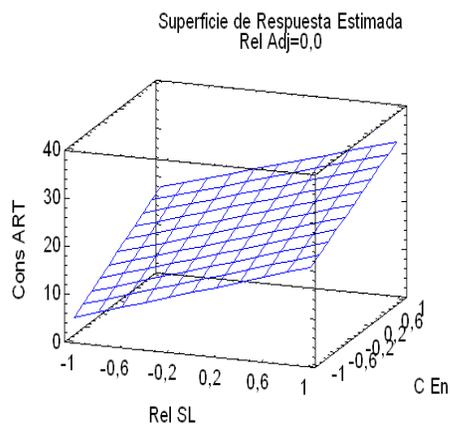
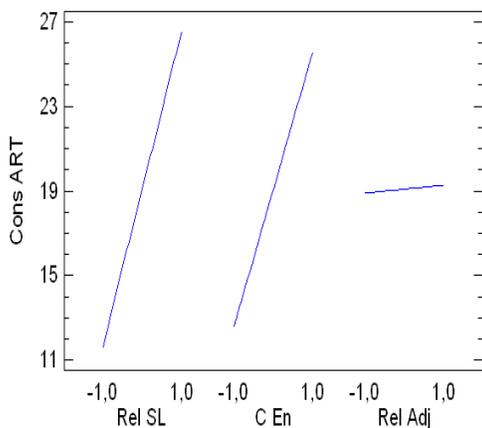


Fig. 2.8 Relación entre el consumo de ART y las variables: relación sólido líquido, concentración de enzima y relación de adjunto.

2.3.2 Grado alcohólico.

Para el grado alcohólico, del análisis de regresión multivariable, se obtiene para un valor de $R^2 = 90,52\%$ la ecuación del modelo:

$$\text{Grado A} = 2,6025 + 0,663125 * \text{Rel SL} + 0,431875 * \text{C En} + 0,326875 * \text{Rel Adj} - 0,053125 * \text{Rel SL} * \text{C En} + 0,336875 * \text{Rel SL} * \text{Rel Adj} - 0,031875 * \text{C En} * \text{Rel Adj}.$$

Diagrama de Pareto Estandarizada para Grado A

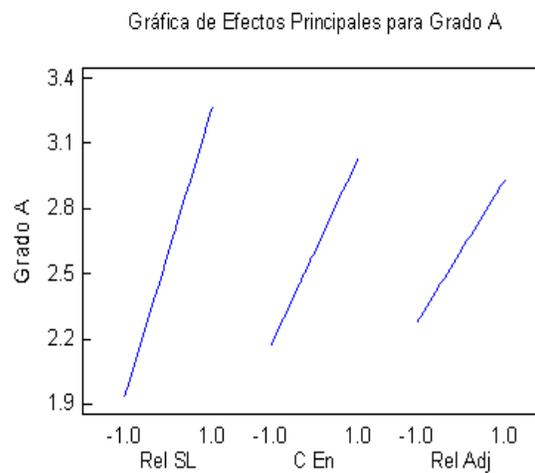
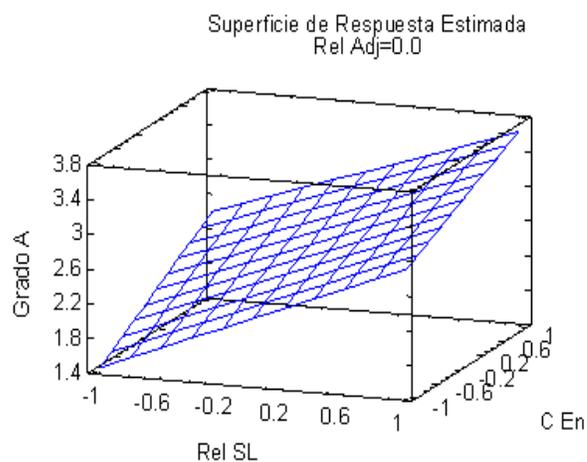
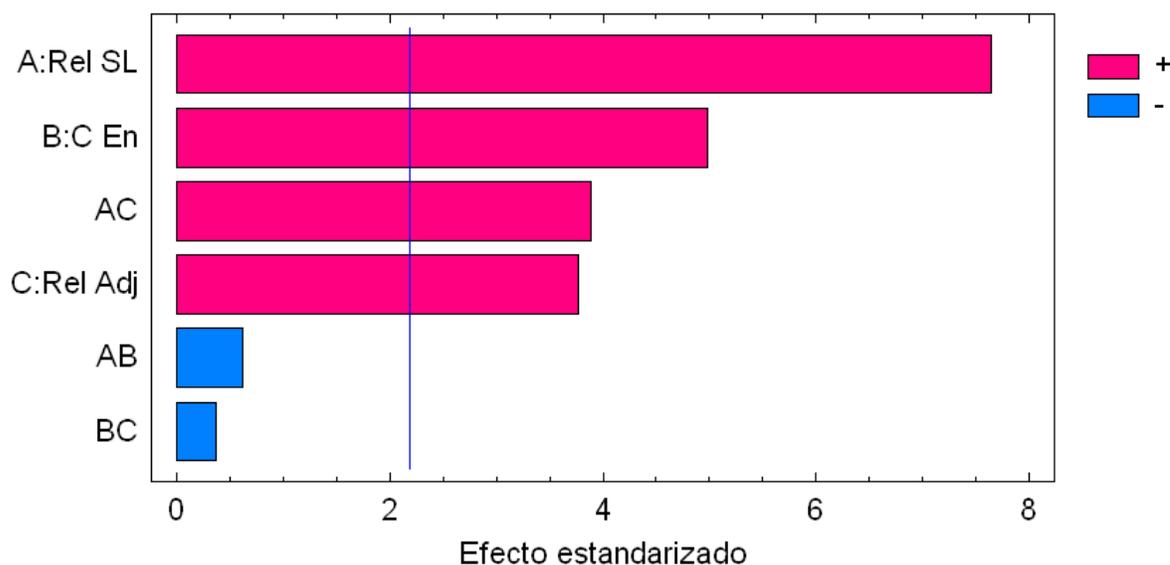


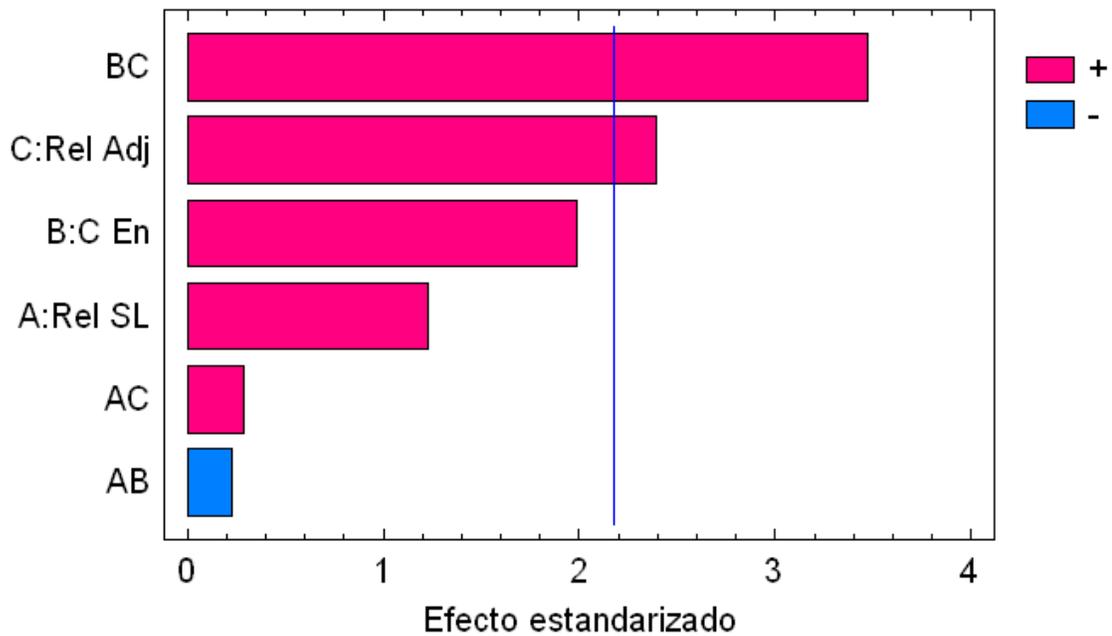
Fig. 2.9 Relación entre las variables independientes y el grado alcohólico.

2.3.3 Rendimiento.

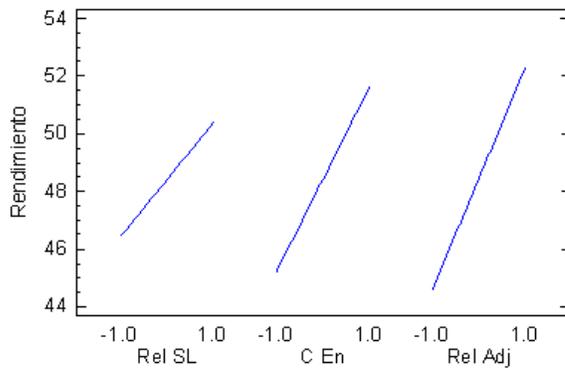
De acuerdo al análisis obtenido para esta variable respuesta se muestra un valor de $R^2 = 90,52 \%$, resultando el siguiente modelo:

$$\text{Rendimiento} = 48,4385 + 1,9875 * \text{Rel SL} + 3,21125 * \text{C En} + 3,86125 * \text{Rel Adj} + 0,365 * \text{Rel SL} * \text{C En} + 0,4725 * \text{Rel SL} * \text{Rel Adj} + 5,60375 * \text{C En} * \text{Rel Adj}.$$

Diagrama de Pareto Estandarizada para Rendimiento



Gráfica de Efectos Principales para Rendimiento



Superficie de Respuesta Estimada
Rel Adj=0.0

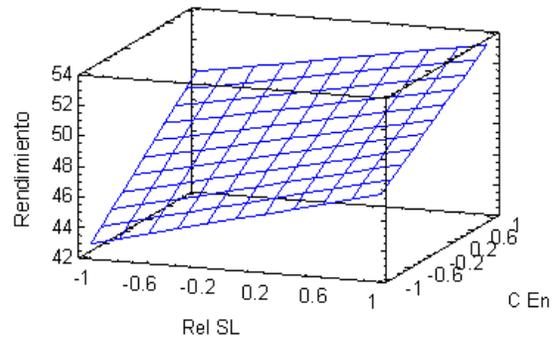


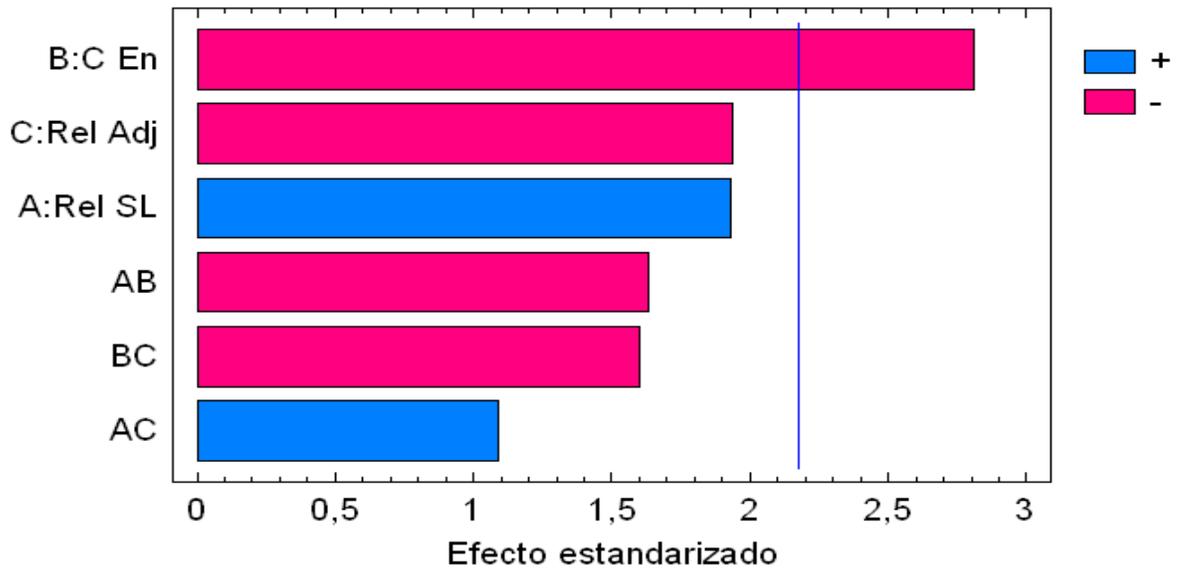
Fig.2.10 Relación entre el rendimiento y las variables independientes: relación sólido líquido, concentración de enzima y relación de adjunto.

2.3.4 Productividad.

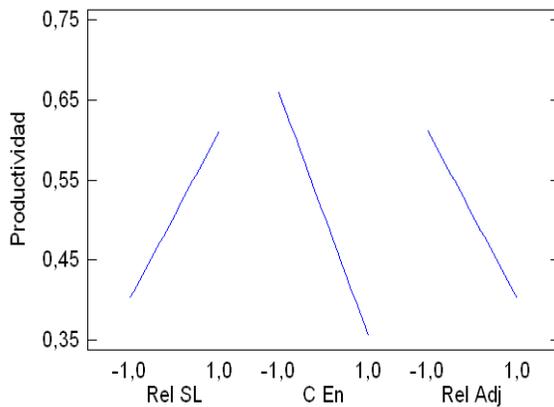
Para un valor de $R^2 = 65,63 \%$ se obtiene el modelo siguiente:

$$\text{Productividad} = 0,50739 + 0,103925 * \text{Rel SL} - 0,1512 * \text{C En} - 0,1042 * \text{Rel Adj} - 0,087825 * \text{Rel S} * \text{C En} + 0,058425 * \text{Rel S} * \text{Rel Adj} - 0,0862 * \text{C En} * \text{Rel Adj}.$$

Diagrama de Pareto Estandarizada para Productividad



Gráfica de Efectos Principales para Productividad



Superficie de Respuesta Estimada Rel Adj=0,0

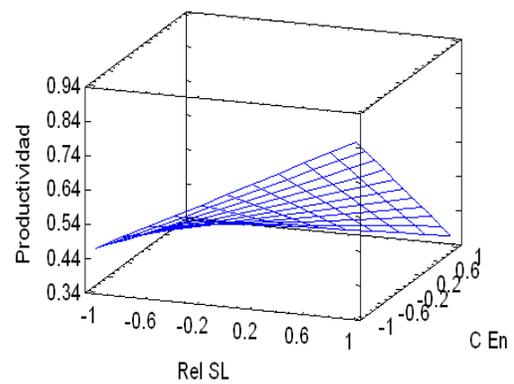


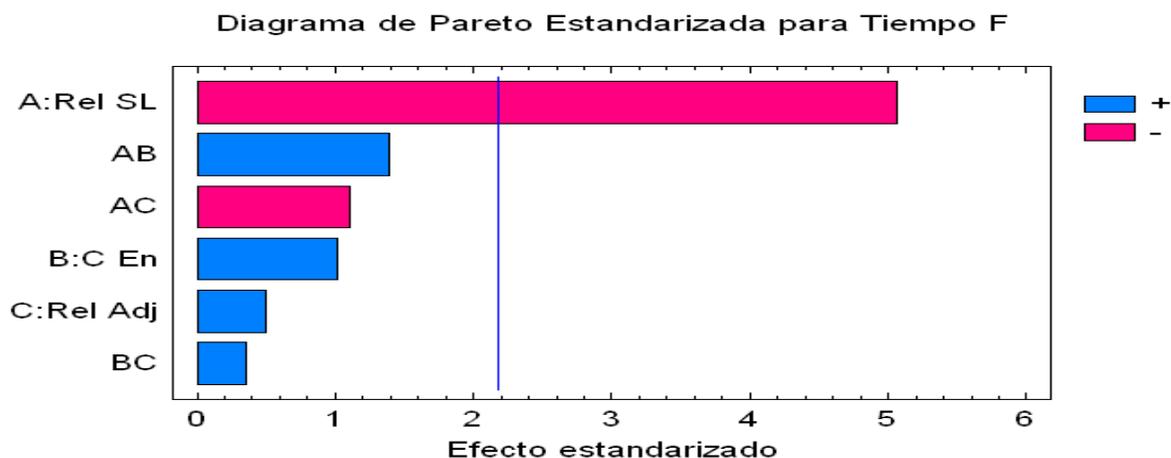
Fig. 2.11 Relación entre el rendimiento y las variables independientes: relación sólido líquido, concentración de enzima y relación de adjunto.

2.3.5 Tiempo de fermentación.

De acuerdo a la influencia de las variables independientes con el tiempo de fermentación, se obtiene la siguiente ecuación del modelo, que se ajusta para un valor de

$R^2 = 71,85 \%$:

$$\text{Tiempo F} = 43,25 - 13,4375 * \text{Rel SL} + 2,6875 * \text{C En} + 1,3125 * \text{Rel Adj} + 3,6875 * \text{Rel SL} * \text{C En} - 2,9375 * \text{Rel SL} * \text{Rel Adj} + 0,9375 * \text{C En} * \text{Rel Adj}.$$



Gráfica de Efectos Principales para Tiempo F

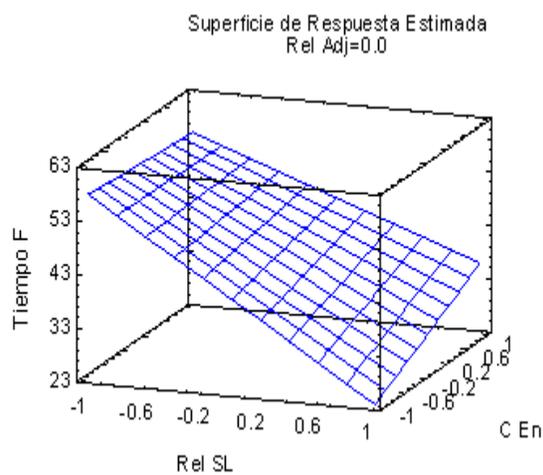
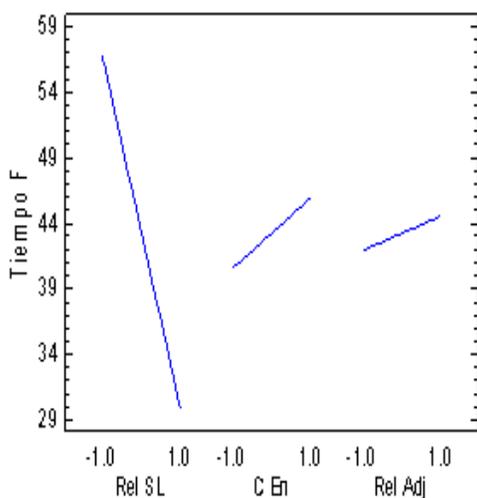


Fig. 2.12 Relación de la productividad con relación sólido líquido, concentración de enzima y relación de adjunto.

El análisis de varianza y de efectos estimados para cada una de las variables respuestas se muestra en el anexo 10.

2.4 Análisis de la etapa fermentativa empleando un jarabe glucosado como adjunto para la elaboración de la cerveza.

Se realizó un experimento fuera del diseño experimental empleando un jarabe glucosado elaborado de la siguiente forma:

Se preparó una suspensión de almidón-agua. Al almidón previamente pesado, a razón de 162,5 g, se le añade 650 ml de agua destilada medidos con una probeta. En la etapa de licuefacción o dextrinización se utilizó la alfa amilasa o Termamyl (120L), para la sacarificación se utilizó la amiloglucosidasa o AMG 300L. El pH óptimo de acción enzimática está entre 4-4,5 y la temperatura de 58-60°C. El jarabe obtenido alcanzó un Brix de 25.5 y 70.26 g/L de Azúcares Reductores Totales.

Para la elaboración de la cerveza se empleó una relación sólido líquido de 133 g/L, una concentración de enzima de 0.08%, un 30% de adjunto malta y una concentración de levadura de 1 g/L; obteniéndose los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 2.14 Resultados de la etapa de fermentación empleando un jarabe glucosado.

Brix (%)		ART (g/l)		ART Consumido (%)	T.Ferm (h)	G.Alcoh (°GL)	Rend. g alc/ g sustrato (%)	Prod. g/L*h
Inicial	Final	Inicial	Final					
15,5	7,3	78,37	29,90	61,84	29	6,4	72	1,9

Con el empleo del jarabe glucosado como adjunto se obtiene un mayor ART al inicio de la fermentación, en el consumo de ART y por tanto un aumento del grado alcohólico, rendimiento y productividad en comparación con los resultados de las experiencias realizadas empleando el jarabe dextrinizado como adjunto, reportadas en la tabla 2.13.

Las cervezas obtenidas al final fueron caracterizadas físicamente, los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.14.

Tabla 2.14 Características finales de las cervezas.

Exp.	Acidez (%)	ph	Brix (%)	Conc. Alcohol.		Densidad (Kg/m ³)
				(°GL)	g/L	
1	0,35	4,21	6,1	3,07	24,3	997,22
2	0,27	3,73	7,4	2,72	21,6	998,01
3	1,304	2,6	4,8	2,6	26,0	999,82
4	-	4,1	5,5	2,37	18,8	996,026
5	0.47	3,03	5,9	2,72	21,6	998,42
6	1,923	2,8	7,7	4,88	38,7	999,81
7	0,42	4,87	5,3	1,00	12,2	998,45
8	-	3,56	8,1	2,02	16,0	998,04
9	1,421	2,3	7,2	3,42	26,2	997,026
10	0,5	4,5	6,9	1,54	13,3	996,42
11	0,48	3,4	7,3	6,4	57,0	997,05
R.1	0,29	3,5	5,7	2,89	21,9	986,2
R.6	0,94	4,4	8,1	4,05	34,5	998,56
R.7	0,58	4,5	5,9	0,89	10,1	997,2
R.10	0,46	2,8	7,1	1,34	11,2	995,1

Como se aprecia la muestra que brinda los mejores resultados es la muestra 11 donde las variables se encuentran en los máximos valores, seguida por la seis que tiene también las variables independientes concentración de enzima y relación sólido líquido en los mayores niveles.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos por Serna, empleando malta de sorgo, sorgo como adjunto y enzima sacarificante amiloglicosidasa (no empleada en estas experiencias), para las que se obtienen un valor de grado alcohólico 3,92 GL, no están muy alejados, al igual que los valores de pH que en las muestras de ese estudio estuvieron entre 5,00 y 5,54.

2.5 Análisis de los resultados.

En el malteado del grano de sorgo, se obtuvo para la etapa de remojo una humedad de 34,4%. En la etapa de germinación se logró un 51.38 % a una temperatura de 30°C valor inferior en comparación a los obtenidos por (Carvajal, 2014) y (Díaz, 2014) de 98 y 96 %, para iguales condiciones de trabajo, situación dada por la mala calidad de la materia prima empleada, lo que conlleva a que la enzima que convierte el almidón en azúcar no actúe de forma eficiente. El secado se realizó a 60°C alcanzándose una humedad inferior al 5 % acorde a lo establecido para maltas claras empleadas en la elaboración de cervezas.

En la etapa de maceración se logró la conversión de los almidones para todos los experimentos, manifestados estos en la variación del Brix desde el comienzo hasta el final de la etapa. El Brix para este tipo de sustrato no es análogo del azúcar dado que pueden existir almidones no convertidos en esta etapa pues el almidón puede contener una serie de constituyentes que, aunque en cantidades mínimas son oligoconstituyentes del almidón o contaminantes no eliminados completamente en el proceso de extracción que pueden afectar. Los mejores valores de Brix se alcanzaron al emplear la mayor relación sólido líquido de 133g/L, una concentración de enzima de 0,08% y un tiempo de acción de dos horas a los 71 °C.

En el procesamiento estadístico desarrollado mediante el Software Statgraphics Centurion XV, para el consumo de ART el análisis de la varianza arrojó que las variables significativas son la relación sólido líquido, la concentración de enzima, la interacción de la relación sólido líquido con la concentración de enzima y con la relación adjunto. De acuerdo al gráfico de Efectos principales no se notan cambios significativos para la relación de adjunto, por otro lado el consumo de ART se favorece con el aumento de la relación sólido líquido y la concentración de enzima.

Para el grado alcohólico las variables de mayor significación son la relación sólido líquido, la concentración de enzima, la relación adjunto y la interacción entre la relación sólido líquido y adjunto. Según los diagramas y el modelo correspondiente esta variable se

favorece con el aumento de la relación sólido líquido, la concentración de enzima y la relación de adjunto, acorde a resultados obtenidos en trabajos preliminares.

Según el análisis de la varianza y el diagrama de Pareto en la variable respuesta rendimiento, las que tienen influencia son la interacción entre la concentración de enzima y la relación de adjunto, seguido la relación de adjunto con p-valor de 0.0047 y 0.0342 respectivamente. Para esta variable se obtienen los mejores valores con el aumento de la relación sólido líquido, la concentración de enzima y la relación adjunto, dado a la influencia positiva de las mismas mostradas en el gráfico de Efectos principales en la figura 2.10.

Por otro lado para la productividad, la única variable de significación estadística resulta la concentración de enzima evidenciado en el Diagrama de Pareto. Los mejores valores para dicha variable se obtienen con el aumento de la relación sólido líquido, la disminución de la concentración de enzima y la relación adjunto, estas últimas no presentan una marcada influencia en el comportamiento de la productividad, cuyo ajuste del modelo es bajo.

La única variable que tiene influencia en el tiempo de fermentación es la relación sólido líquido para el Diagrama de Pareto con p-valor equivalente a 0.0003. Los menores tiempos de fermentación se obtienen para menores niveles de relación sólido líquido la concentración de enzima y la relación adjunto.

La calidad de las cervezas obtenidas en su principal parámetro grado alcohólico, muestra resultados positivos al igual que otros parámetros físicos como la densidad, olor, color; no siendo así para la acidez y la brillantez, debido a ineficiencias experimentales durante la etapa de filtración del producto final.

Los colores de estas cervezas son similares a las de las cervezas claras comerciales, (muestras como la 8 y la 11 se tornan más opacas), no así el sabor, pues la mayoría de las cervezas añaden azúcar también como adjunto, para mejorar sabor y ayudar a la fermentación y en este caso se emplea un jarabe dextrinizado como adjunto. Presentan un menor desarrollo del sabor y capacidad espumante que las elaboradas convencionalmente a partir de malta de cedada, lo que coincide con lo experimentado por (Ortega, 2001).

CAPÍTULO 3: Diseño y selección del equipamiento. Análisis económico.

Se precisa el diseño de una planta de producción de cerveza a partir de malta de sorgo, empleando jarabe glucosado como adjunto que fue el experimento de mejores resultados. Este capítulo se centra en el análisis económico del diseño y selección del equipamiento del proceso tanto de la planta de malteado con una capacidad de 750 kg/día, como la de producción de cerveza para 1 HL/día, siendo necesario cuantificar las corrientes del proceso mediante balances de masa y energía

3.1 Proceso de producción de cerveza.

El proceso de producción de cerveza cuenta de varios procesos en su interior que a su vez están conformados por varias etapas, las que se resumen en la función objetivo de la fig. 3.1

3.1.1 Proceso de la producción de la cerveza.

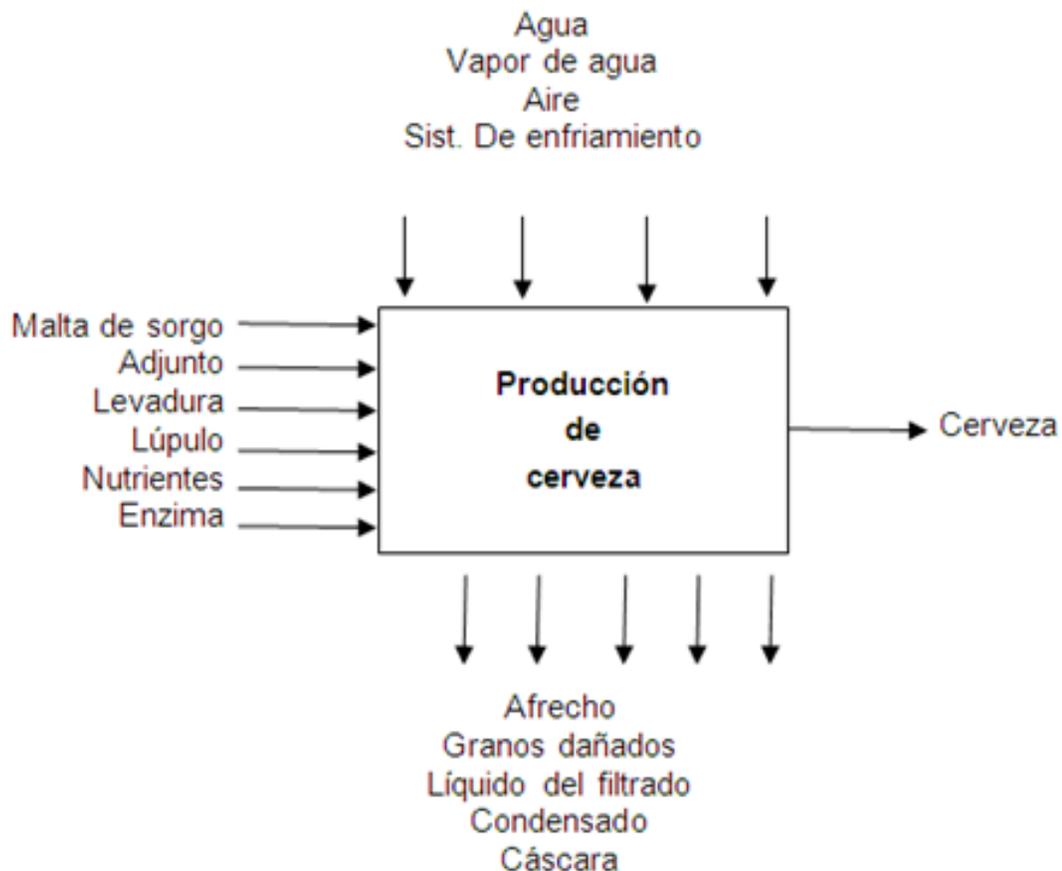


Figura 3.1. Función total del proceso de producción de cerveza a partir de sorgo.

La etapa de malteado resulta de las más importantes para la producción de cerveza, en las cervecerías cubanas no se cuenta con una tecnología destinada a estos fines, para ello se tomaron los resultados obtenidos por Díaz (Díaz, 2014) para la capacidad de 750 kg/día de malta de sorgo producida.

En la Figura 3.1, se presenta el diagrama de bloques de cada una de las etapas que componen el proceso.

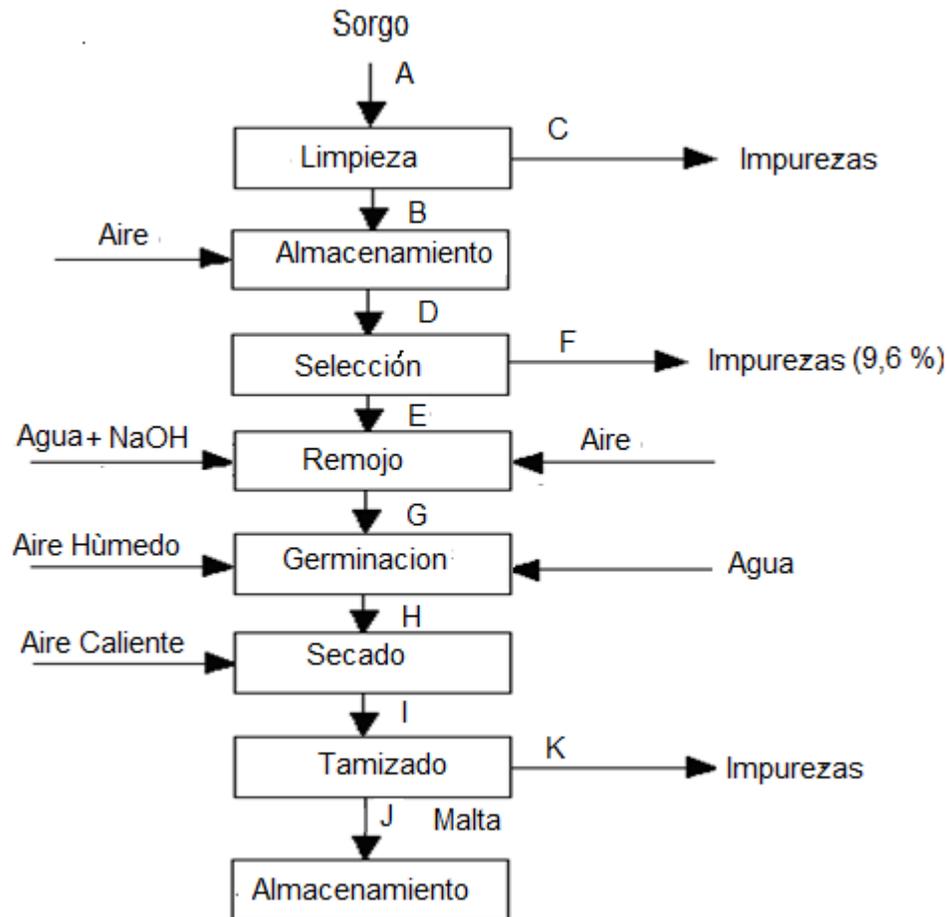


Figura 3.2. Diagrama de bloques del proceso de malteado.

3.2 Selección preliminar del equipamiento.

3.2.1 Tanques de almacenamiento.

Los tanques que se usarán para el almacenamiento de la materia prima serán silos ya que son los únicos utilizados para el almacenamiento de sólidos y además son los que cumplen con los requisitos del proceso.

3.2.2 Cribas.

La tendencia actual en el cribado industrial de materiales granulares de todo tamaño es el uso de las cribas vibratorias, debido a su mayor capacidad y menor gasto de energía. Las cribas que se pueden usar miden 33 mm (13") de diámetro, y 47.5 mm (1 7/8") de profundidad, con agujeros circulares de 1/12" para semillas pequeñas o de triángulo con círculo inscrito de 5/64" (triángulo de 8/64"). Si no se cuenta con cribas apropiadas, se puede vaciar la muestra sobre una superficie limpia y separar manualmente las impurezas.

3.2.3 Tanques de remojo.

Para el remojo del grano se seleccionó un tanque de fondo cónico ya que el medio a almacenar es una mezcla de líquido y sólidos, además es más fácil su aireación y para la carga y descarga, así como para la limpieza.

3.2.4 Germinador.

La germinación usualmente es conducida por uno o dos métodos:

1. Método de tambor
2. Método de compartimentos.

Como la calidad de la malta es la misma en los dos métodos se pretende utilizar el método de compartimiento por presentar menores costos de inversión y mantenimiento.

3.2.5 Secadero.

En el proceso de secado se utilizan un secadero de bandejas o un secadero de lecho fluidizado, se opta por un secadero de bandejas por ser este utilizados en el secado de estos granos en el mundo, y presenta menor costo.

3.3 Balance de materiales.

Para la realización de estos cálculos se partió de una demanda de 750 Kg/día de malta de sorgo. Las etapas que se enumeran a continuación se corresponden con lo establecido en la *Figura 3.2*.

Etapas No 7

$$J = 750 \text{ Kg/d} \quad J=I-10\%I \quad I=J/0.9$$

$$J = I-K \quad J=I(1-.10) \quad I=750/0.9$$

$$K = 10\%I \quad I=833.33 \text{ Kg/d}$$

$$K = 0.1*833.33 \quad K = 83, 33 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 6

$$I (1-0.05)=H (1-0.45) \quad H=I*0.95/0.55$$

$$H=833.33*0.95/0.55$$

$$H = 1439.39 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 5

Hay que tener en cuenta que durante el remojo hay un aumento del 30% del sorgo que entra y en la germinación también.

$$H = 1.3G \quad G=1439.39/1.3$$

$$G=H/1.3 \quad G=1107.22 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 4

$$G = 1.3E \quad E=1107.22/1.3$$

$$E=G/1.3 \quad E=851.71 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 3

$$D = E+F \quad D=E+3\%D \quad D=E/0.97 \quad D=878.05 \text{ Kg/d}$$

$$F = 3\%D \quad E=D(1-0.03) \quad D=851.71/0.97$$

$$F=0.03*878.05$$

$$F=26.34 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 2

$$B = D$$

$$B=878.05 \text{ Kg/d}$$

Etapa Nº 1

$$A = B+C \quad A=B+2\%A \quad A=B/0.98 \quad A=895.97 \text{ Kg/d}$$

$$C = 2\%A \quad B=A (1-0.02) \quad A=878.05/0.98$$

$$C=0.02*895.97 \quad C=18 \text{ Kg/d}$$

3.4 Dimensionamiento de los equipos principales.

El dimensionamiento de los equipos principales de esta planta aparece reportado en (Díaz, 2014), las dimensiones fundamentales de los mismos se reportan en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Dimensionamiento de los equipos principales

Equipo	Ecuación	Datos	Resultados	Referencia
Tanques o silos de almacenamiento	$V_{cil} = d^2 \cdot h \cdot \pi / 4$ $h = 2 \cdot d$ $d = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot V_{cil}}{\pi}}$	$V_{cil} = 23,95 \text{ m}^3$	d = 2,52 m h = 5,04 m	(Pargas M. 1994)
Cribas vibratorias de 56 t/h de capacidad	<p>Área</p> $A_3 = \frac{Q_m}{K \cdot q \cdot \rho}$	$Q_m = 0,780 \text{ t/h}$ $dp_3 = 2 \text{ mm}$ $q_3 = 5,5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$ $k = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ t/kg}$ $\rho_{\text{sorgo}} = 660 \text{ kg/m}^3$	1,28 m ²	(Pargas M. 1994)
Tanques de Remojo	$V_t = V_{cil} + V_c$ $V_t = (\pi \cdot d^2 \cdot h_{cil}) / 4 + (\pi \cdot d^2 \cdot h_{cono}) / 12$ $d = \sqrt[3]{\frac{V_t}{1.854}}$ $h_{cil} = 2d$ $h_{cono} = d / 0,46 \cdot 2$	$h_{cono} = d / 0,46 \cdot 2$ $h_{cil} = 2d$ $V = 1,26 \text{ m}^3$	d = 0,8 m h_{cil} = 1,6 m h_{cono} = 0,86 m	(Pargas M, 1994)
Secadero	$(L_s / A_s) = \rho_s \cdot z$ $A_s = L_s / \rho_s \cdot z$ $N_b = A_s / A_b$	$\rho_{\text{malta}} = 660 \text{ kg/m}^3$ $z = 25 \text{ mm}$ $L_s = 791,66 \text{ kg}$ $A_s = 48 \text{ m}^2$ $A_b = 0,36 \text{ m}^2$	A_s = 48 m² N_b = 133	(Pargas M, 1994)
Silos de almacenamiento Producto	$V_c = J / \rho$	$\rho_{\text{sorgo}} = 660 \text{ kg/m}^3$ $J = 225 \text{ 000 kg/a}$	$V_c = 450 \text{ m}^3/\text{a}$	(Pargas M, 1994)

El número de equipos aparecen reflejados en la tabla 3.17 de la parte económica

3.5 Proceso de producción de cerveza.

El proceso de producción de cerveza cuenta de varios procesos en su interior que a su vez están conformados por varias etapas, el esquema de producción (Anexo12).

Selección del equipamiento.

La selección de los equipos se realizó mediante el texto de Diseño y Economía de los Procesos de Ingeniería Química (**Ulrich, 1985**).

Se deben seleccionar equipos para las siguientes operaciones:

1. Reducción de tamaño del grano
2. Transporte de sólidos
3. Calentamiento y cocción a presión de la masa
4. Enfriamiento de la masa
5. Filtración

3.5.1 Molinos.

Para la selección de un molino es necesario tener en cuenta varios parámetros como son la naturaleza del material (sólido) y el tamaño de partícula que se desea obtener. Esta se realizó por la tabla 4.5 del Peter, atendiendo a los diferentes parámetros de esta tabla, como son la relación de reducción, la capacidad (Kg/s), el costo, el consumo de potencia, la compatibilidad con diferentes materiales y por último los materiales específicos del tipo de molino. Se analizaron molinos rotatorio de bolas, de Martillos y de Energía de Fluidos, entre ellos se seleccionó un molino de martillos porque es el más adecuado para el proceso debido esto a que es posible ajustar la finura deseada de las partículas variando el espacio entre las hojas fijas de la carcasa y los martillos móviles y además es el recomendado por la literatura para estos procesos.

3.5.2 Transportadores.

Los transportadores son usados para transportar la malta y los adjuntos desde su recepción hasta los elevadores. Para la selección de ellos se tuvieron en cuenta los parámetros tales como diámetro o anchura, longitud, capacidad máxima de sólidos expresado en m^3/s , compatibilidad de los sólidos fibrosos, el transporte hacia arriba en un plano inclinado, la elevación vertical, el ángulo de inclinación limitado, el costo relativo anual y el consumo de potencia. Se analizaron transportadores de banda, de tornillo sinfín, elevador de cangilones y de cadenas y paletas en flujo continuo. De acuerdo a que

el sólido que se necesita transportar es un sólido granular (sorgo) y considerando que debe introducirse en el tanque de cocción, se ha escogido el tornillo sin fin, a pesar de ser el transportador con mayor costo y consumo de potencia, pero es el más eficiente para este tipo de material.

3.5.3 Macerador y tanque de cocción con Calentamiento y Agitación.

El macerador y el tanque de cocción tienen como principal característica que tratan grandes volúmenes a batch y que son tanques agitados con medios de calentamiento y para la selección se compara si calentar con una chaqueta o serpentín. Para estas dos etapas del proceso se escogieron tanques enchaquetados con agitación, por las cantidades de calor que habría que manejar, a pesar de ser recipientes relativamente pequeños, no importó el alto costo de las chaquetas, frente a su gran eficiencia en dicho proceso.

3.5.4 Agitador.

En la selección de los agitadores se tuvieron en cuenta características tales como, velocidad de rotación, velocidad circunferencial en función de la viscosidad, costo, consumo energético, volumen de agitación, tipo de suspensión, la cantidad de impelentes en el mismo eje y otras, se consideraron los de Hélice o propela, de Turbina y de Paletas, resultando seleccionado el agitador de tipo paletas, ya que el mismo tiene bajo costo y por qué el mezclado que se necesita no es tan grande e intenso. Además se recomienda para grandes volúmenes, con respecto al tamaño de los agitadores. También se tuvieron en cuenta las propiedades de la mezcla que se va a agitar, su viscosidad y densidad, e incluso se reporta en el diseño.

3.5.5 Filtro.

En la selección del filtro se valoraron las ventajas que brinda el filtrado continuo, en cuanto a productividad, pero por el alto costo de este y la particularidad del proceso, que es completamente a batch, en las etapas anteriores, se valoraron los filtros de marcos y placas, filtro prensa y de criba y se tomó la decisión de seleccionar un filtro de marcos y placas.

3.5.6 Bombas.

Existen diversas variedades de bombas dentro de las que se destacan para el uso industrial las bombas centrífugas y las recíprocas o de desplazamiento positivo.

Tomando como patrón las características de los fluidos a tratar la bomba seleccionada fue las bombas centrífugas de flujo axial. Además estas sirven para mover grandes volúmenes de líquido, con bajos diferenciales de presión.

3.5.7 Tanques de almacenamiento del producto final.

En el almacenamiento del producto final es necesario un tanque al cual se le pueda realizar un control de la temperatura como parámetro fundamental. Los tanques de fondo cónico a pesar de que sean más costosos cumplen con los requisitos para lograr un buen almacenamiento del producto final. Además trabaja en un intervalo de -250 a 800°C , con una presión máxima de 14 atm.

3.6 Balances de masa y energía en la producción de cerveza.

3.6.1 Balances de masa.

Para determinar los valores de las variables que se manejarán en el proceso es necesario realizar los balances. En la realización de los mismos se deben tener en cuenta los criterios para el uso de los balances, tanto parciales como totales, tomando en consideración los principios básicos de la Ingeniería Química.

Leyenda para el balance de masa

MP: Masa de Materia Prima.	Vc: Volumen de cerveza
MPT: Masa de Materia Prima Triturada	Le: Masa de levadura
Mm: Masa Mosto macerado	E: Enzima
V _a : Volumen de Agua	pa: Densidad del agua
M _a : Masa de agua	Aj: Adjunto
Af: Afrecho	C: Cerveza
A: Agua que se adiciona en el filtrado	R: Residuo del filtro
Mfilt: Masa de Mosto a la salida del filtro 2	L: Masa de Lúpulo
M _f : Masa de Mosto a la salida del filtro 1	MC: Masa del Mosto Cocinado
Rf: Residuo del fermentador	

Tabla 3.2. Balances de Masa

Equipos	Datos	Ecuaciones	Resultados
Molino	MP= 13,3 Kg	B. Total MPT = MP	MPT = 13,3 Kg
Macerador	MPT: 13,3 Kg ρA : 1 000 Kg/m ³ VA: 0,1 m ³	B. Total Mm = MPT+MA MA = VA * ρA	Mm= 113,3 Kg MA= 100 Kg
Filtro	Mm= 113,3 Kg Af = 20% Mm A=0,01m ³	B. Total Mf= (Mm – Af)+A	Mf= 102 Kg Af= 23 Kg A=10 Kg
Tanque cocción	Mf= 102 Kg Aj: 5,7 Kg L = 0.3 Kg	B. Total MC = Mf + Ad + L	MC = 108 Kg
Fermentador	Le=1.0 Kg Mfilt= 108 Kg $\rho = \frac{998.24Kg}{m^3}$ Vc= 0,1 m ³	Balance total Mfilt=C+Rf C=Vc* ρ	C = 99,83 Kg Rf= Kg

3.6.2 Balances de energía.

En todo proceso es necesario el conocimiento de las corrientes energéticas involucradas por lo que se plantean los balances de energía con el objetivo de determinarlas.

Leyenda de los Balances de Energía

Ti: Temperatura de entrada al macerador °C.

λ : Calor latente .

Tf: Temperatura a la salida del macerador °C.

Qc: Calor cedido *kJ* .

Qg: Calor ganado *kJ* .

Te: Temperatura de entrada a los tachos °C.

Ts: Temperatura a la salida de los tachos °C.

ΔT : Variación de temperatura °C.

Cp1: Capacidad calorífica a la entrada del macerador.

Cp2 : Capacidad calorífica a la entrada del tacho .

V₁: Masa de vapor necesaria en macerador Kg.

V₂: Masa de vapor necesaria en los tachos Kg.

V_{total}: Vapor total del proceso

M_{comb}: masa de combustible

Tabla 3.3. Balances de energía.

Equipo	Datos	Ecuaciones	Resultados
Macerador	T _i : 30 °C T _f : 71 °C C _{p1} : 3,2908 kJ/kg°C λ: 2 051,6 kJ/kg M _m = 113,3 Kg	Q _g +Q _c =0 Q _g =-Q _c Q _g =M _m *ΔT*C _{p1} Q _c =V ₁ *λ V ₁ =Q _c /λ	Q _g =15 516,12 kJ Q _c =-15 516,12 kJ V ₁ =7,56 kg
Tanque de cocción	T _e : 30 °C T _s : 105 °C MC = 108 Kg C _{p2} : 3,2684 kJ/kg°C	Q _g +Q _c =0 Q _g =-Q _c Q _g =MC*ΔT*C _p Q _c =V*λ V=Q _c /λ	Q _g =25 920 kJ Q _c =-25 920 kJ V ₂ = 12,63 kg
Calderas	P: 0,784 mPa η: 0,8 ΔH _{vaporsat} : 2768,1 kJ/kg P _c : 43 064 kJ/kg	V _{total} =V ₁ +V ₂ Q _g +η*Q _c =0 Q _c =-Q _g /η Q _g = V _{total} * ΔH _{vapor} Q _c = M _{comb} *P _c	V _{total} = 20,18 Kg Q _g = 55 860,26 kJ Q _c = -69 825,32 kJ M _{comb} = 1,62 kg

3.7 Dimensionamiento de los Equipos para la elaboración de cerveza.

El dimensionamiento de los equipos destinados a la producción de cerveza, se realizó atendiendo a la propuesta de la instalación de una planta piloto de cerveza de sorgo. El diseño de los equipos y sistemas auxiliares se realizará utilizando como referencia el Rosabal, Ulrich, Pavlov, Mijeev, Kern, entre otros.

3.7.1 Tanques de mezclado con chaqueta y agitación.

En las siguientes tablas se muestra el dimensionamiento del tanque, la chaqueta y el agitador de paleta de la maceración.

Tabla 3.4. Diseño tanque de maceración.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Volumen total	Qv = 0,1 m ³ /día t=1 día	Vt = Vi+ Vsd Vi = Qv*t Vsd = 0,2*Vi	Vi = 0,1 m ³ Vsd = 0,02 m ³ Vt = 0,12 m ³	(Rosabal and V., 1989)
Diámetro	Vt = 0,12 m ³	$D = \sqrt[3]{\frac{4 * Vt}{1.5 * \pi}}$	D = 0,46 m	(Rosabal and V., 1989)
Altura	D = 0,46 m	h = 1,5*D	h = 0,69 m	(Rosabal and V., 1989)

Tabla 3.5. Diseño chaqueta de calentamiento.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencia
Área de transferencia de calor	D = 0,46 m h = 0,69 m	$A = \pi * d * h * \left(\frac{\pi * d^2}{4} \right)$	A= 1.17 m ²	(Kern, 1988)
Ud	Rd = 0,005 $hd = \frac{1}{Rd}$ hd = 200	$Ud = \left(\frac{Uc * hd}{Uc + hd} \right)$	$731.3 \left(\frac{J}{s * C * m^2} \right)$	(Kern, 1988)
Uc	h _{io} =1500Btu/hpie ² °F ho:476,9	$Uc = \frac{ho * hio}{ho + hio}$	361,8	(Kern, 1988)

Tabla 3.6. Diseño agitador de paleta.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Ref.
Largo del rodete(d)	D = 0,46 m	= 0,65*D	0,3 m	Rosabal
Ancho del rodete		$\frac{d}{8}$	0,04 m	Rosabal
Altura desde el fondo del recipiente hasta el agitador		0,25* Ht	0,17 m	Rosabal
Arquímedes(Ar)	Dp = 0,002 m ρl = 1 000 kg/ m ³ ρs = 700 kg/ m ³ μ: 2.45 Pa*s	$Ar = \frac{Dp^3 * \rho_l * (\rho_l - \rho_s)}{\mu l}$	9,79*10 ⁶	Rosabal
Reynold Modificado (Re _m)	C = 14.8 tabla 9.1 K = 0 tabla 9.1 d = 0.33 tabla 9.1 Dp = 0.002 m	$Re_m = C * Ar * \left(\frac{Dp}{d} \right)^{0.5} * \left(\dots \right)$	2,89*10 ⁵	Rosabal

Revoluciones del agitador(n)		$n = \frac{Re_m * \mu}{\rho_s^2 * D}$	6.1	Rosabal
Factor de potencia de agitación (Kn)	Re _m Fig. 9.7		0.15	Rosabal
Consumo de potencia del Agitador(N)		$N = kn * \rho * n^3 * D^3$	420, 90 kWh	Rosabal

3.7.2 Filtro de marcos y placas.

Al ser seleccionado un filtro de marcos y placas de acción continua por las características del mismo donde uno de los parámetros más importantes en el diseño y operación es el espesor del sedimento y el área del mismo.

Tabla 3.7 Diseño filtro de placas y marcos.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultado	Referencias
Masa de sólidos en la torta /unidad de volumen de líquido	%Sólido. Torta 0,38	$X_t = \frac{x}{1-x}$	0,61	Rosabal
Masa de sólidos /Masa de líquido(X _s)	%Sólido 0,19	$X_s = \frac{x}{1-x}$	0,23	Rosabal
Masa de sólidos en la suspensión/unidad de volumen de líquido	ρ _s =1 050Kg/m ³	$C_s = X_s * \rho_s$	241,5 Kg/m ³	Rosabal
Masa de sólidos en la torta/unidad de volumen filtrado(C)	ρ _t = 948 Kg/m ³	$C = \frac{C_s}{1 - \left(\frac{C_s}{X_t * \rho_t} \right)}$	416,38	Rosabal
Superficie de filtración (S)	hmarco: 0,05 m Vfiltrado: 0,115 m ³	$S = \frac{C * V}{X_t * \rho_t * h}$	1,66 m ²	Rosabal

3.7.3 Fermentador.

Este equipo es uno de los más importantes en el proceso pues en él ocurre la transformación del mosto lupulizado en cerveza, en la tabla 3.8, se muestra el diseño de dicho equipo.

Tabla 3.8 Diseño del Fermentador.

Nomenclatura	Datos	Ecuación	Resultados	Referencia
Volumen	Q = 0.1 m ³ /d t=1 día	$V = \frac{Q}{t}$ Vreal=1.2 *V	V= 0,1 m ³ V real=0,12 m ³	O'Levenspiel
Altura	$\frac{H}{D} = \left(-3 \right)^{\frac{1}{3}}$	$V = \frac{\pi D^2}{4} * H$ H=2*D	H=0,92 m D=0,46 m	O'Levenspiel

3.7.4 Recipientes de almacenamiento para el proceso.

Se necesitan cinco tanques para el almacenamiento de las diferentes corrientes. Las dimensiones de estos se muestran en las tablas mostradas a continuación.

Tabla 3.9 Tanque de almacenamiento de materia prima.

Parámetros	Valores	Unidades
Volumen	4,5	m ³
Diámetro	2,5	m
Altura	6	m
Material de construcción	Acero inoxidable	
Sustancias a manipular	Granos malteados	
Temp. de almacenamiento	30	°C
Presión de trabajo	1	atm

Tabla 3.10. Tanque de almacenamiento del jarabe dextrinizado.

Parámetros	Valores	UM
Volumen	4,5	m ³
Diámetro	2,5	m
Altura	6	m

Material de construcción	acero inoxidable	
Temp. de almacenamiento	30	°C

Tabla 3.11. Tanque de almacenamiento de agua.

Parámetros	Valores	UM
Volumen	1	m ³
Diámetro	0,92	m
Altura	1,7	m
Material de construcción	Acero al carbono	
Sustancias a manipular	Agua	
Temp. de almacenamiento	30	°C
Presión de trabajo	1	Atm

3.8 Economía del proceso.

3.8.1 Costo de inversión.

Costo de adquisición del equipamiento

$$Costo_{Actual} = Costo_{Original} \frac{Indice_{Actual}}{Indice_{Original}}$$

Índice actual.....580,1

Índice original.....356 año 1991(Peters, 1991)

Tabla 3.12. Costo de adquisición del equipamiento.

Equipos	Número de equipos	Costo original	Costo actualizado
Tanque de almacenamiento	5	1850	3014,564607
Elavadores	3	5300	8636,320225
Cribas	3	5000	8147,47191

Tanque de remojo	2	7250	11813,83427
Germinadores	2	9000	14665,44944
Secadero	1	10000	16294,94382
Bomba centrífuga	1	1800	2933,089888
Molinos de martillos	1	480	782,1573034
Condensador	1	850	1385,070225
Fermentador	1	3750	6110,603933
Tanque Macerador	1	1489	2426,317135
Tanque Cocción	1	1500	2444,241573
Tanque Maduración	1	1500	2444,241573
Elevadores	1	1540	2509,421348
Filtro	3	2059,52	3355,97627
Tanque de envasado	1	1500	2444,241573
Tanque de almacenamiento	3	1500	2444,241573
Agitador	1	1000	1629,494382
Bombas	4	500	814,747191
Válvulas	13	60	97,76966292
Costo Total (\$).	94394,20		

La estimación del costo total de inversión se realizó utilizando los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes a la tabla 17 del Peters, adaptándola a las características de la inversión.

$$CTI = \text{Costo Fijo de Inversión (CFI)} + \text{Inversión de Trabajo (IT)}$$

$$CTI = CFI + IT$$

$$IT = 15 \% CTI$$

$$CFI = \text{Costos directos} + \text{C.indirectos} + \text{Derecho de contrato} + \text{Contingencia}$$

Tabla 3.13. Estimación del Costo Total de Inversión.

Estimación de los Costos Directos		
Componentes	%	Costo (\$)
Costo del equipamiento (E)		94394,20
Instalación	39 % E	70869,72
Instrumentación y Control	18 % E	26996,741
Instalaciones eléctricas	10% E	18171,72
Tuberías y accesorios	16% E	29074,77
CD		74112,782
Estimación de los Costos Indirectos		
Componentes	%	Costo (\$)
Ingeniería y supervisión	0.15 % E	14154,13
CI		14154,13
CD + CI		88266,912
Otros Componentes	%	
Derecho de contrato	5% (CD + CI)	15211,63
Contingencia	10% (CD + CI)	30423,25
Costo Fijo de Inversión (CFI)		349867,375
Costo Total de Inversión (CTI)		411608,676

3.8.2 Costos Totales de producción.

Para la estimación del costo total de producción se utilizaron los factores de proporción y las ecuaciones correspondientes que se encuentran en la tabla 27 del Peters. Los precios de los productos obtenidos se toman de los valores reportados por la fábrica de cerveza de Manacas.

CTP = Costo de fabricación (CF) + Gastos Generales (GG)

CTP = CF + GG

CF = Costos directos (CD) + Cargos Fijos (Cf) + Costos Indirectos (CI)

CF = CD + Cf + CI

GG = Distribución y venta (DV) + Admon (A) + Inves. y Des.(ID)

$$\text{Depreciación} = \frac{CFI - VR}{Vd}$$

VR: valor residual, asumimos VR=0

VD: vida útil igual a 15 años.

Tabla 3.14. Estimación del Costo Total de Producción.

Estimación de los Costos Directos		
Componentes	%	Costo (\$)
Materia prima (sorgo, adjunto, lúpulo, levadura, enzima)		74815,39
Mano de obra	10 %CTP	1 675,54
Supervisión	15 % Mano de obra	83,77
Requerimientos	10 %CTP	1 675,54
Mantenimiento y reparación	2 %CFI	1 818,40
Suministro	0.5 % CFI	454,60
CD = 3 473,01 + 0.215 CTP		
Estimación de Cargos Fijos		
Componentes	%	Costo (\$)
Depreciación		6 061,36
Impuestos	1 %CFI	909,20
Seguros	0.4 % CFI	363,68
Cf = Depre + 0,014 CFI = 7 334,246		
Estimación de los Costos Indirectos		
Costos indirectos	5% CTP	62664,947
CI = 0,05 CTP		
Gastos Generales		
Componentes	%	Costo (\$)
Administrativos	2 % CTP	335,11
Distribución y ventas	2 %CTP	335,11
Investigación y desarrollo	5 %CTP	837,77
GG = 0,09 CTP		

Como $CTP = CF + GG$, sustituyendo las ecuaciones obtenidas en las tablas anteriores tenemos que:

$$CTP = 117128,696 + 8201,198$$

$$CTP = 125329,894 \text{ \$/año}$$

3.8.3 Cálculo de la ganancia.

$$\text{Ganancia} = \text{Precio de venta del producto} - \text{Costos totales de producción}$$

Tabla 3.15 Determinación de la ganancia.

Producto	Precio	Cantidad Anual (Kg/año)	Valor del Producto (\$/año)
Malta de sorgo	0,55(\$/Kg)	132606,0	72933,3
Cerveza	1,3 (\$/L)	17996,4	23400
Afrecho	0,4 (\$/Kg)	4140,0	1656,0
Precio de venta de los productos finales (\$)			97989,3
Ganancia (\$)			-83727,93

3.8.4 Indicadores dinámicos económicos.

El Valor Actual Neto (VAN) es uno de los más importantes indicadores económicos que se tuvo en cuenta, ya que es el valor que se obtiene cuando se termina la vida útil y es la forma de comprobar si la inversión que se propone es rentable.

$$\text{ValorActualNeto} = \sum_{k=1}^n \frac{\text{Flujodscaja}}{(1+i)^k} - \text{InversiónTotal}$$

TIR: Tasa interna de recuperación de la inversión.

PRD: Período de recuperación al descontado.

3.8.5 Análisis de sensibilidad.

Al no ser rentable la planta, debido a la capacidad tomada, se propone realizar un análisis de sensibilidad con el fin de variar el precio del producto final hasta alcanzar la rentabilidad, siempre que los precios estén acordes a los existentes en el mercado nacional. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.15.

Tabla 3.16 Resultados del análisis de sensibilidad.

Precio de la cerveza (\$/L)	VAN(\$)	TIR (%)	PRD (años)
5	207418,55	6	15
8	935339,63	22	8
9	1177979,99	27	7
10	1420620,35	31	6
11	1663260,71	36	5
12	1905901,07	40	4,7
13	2148541,43	45	4
14	2391181,79	49	3,8
15	2633822,15	54	3,4

Como puede apreciarse en la tabla anterior, solamente se acerca la inversión a la rentabilidad económica, a partir de un precio de venta del producto de \$11/L precio elevado, pero si se analiza al sector que va dirigida esta bebida, no es elevado, por ser un producto que no producido en Cuba.

Análisis de los resultados.

La proyección de la planta piloto para la obtención de cervezas empleando integralmente el grano de sorgo para una capacidad de 100 L/día, no es factible desde el punto de vista económico, considerando la venta de cerveza a un precio de 1,3 \$/kg, la malta sobrante a 0,55 \$/kg y el afrecho a 0,40 \$/kg.

Se toma una capacidad pequeña de planta, la cual se pudiera estimar hasta que valor de producción se hace rentable, pues esta capacidad de 100 L aporta 12 cajas de 24 botellas/día en envases de 330 mL, lo cual cubriría la necesidad de consumo de los cientos de enfermos celíacos adultos de la provincia, pero no para los 250 000 del país, como aparece reportado en el periódico Vanguardia del 18 junio del 2016, que si bien muchos pensarán que es una bebida alcohólica no necesaria para la vida, resulta una bebida nutritiva, antioxidante y una opción nutritiva compatible con la dieta de dichos pacientes.

Se realiza un análisis de sensibilidad al precio del producto el cual muestra que los indicadores dinámicos son adecuados para una planta piloto de 100L/día, con un valor actual neto (VAN) equivalente a \$ 1905901,07, con una tasa de rendimiento interno (TIR) de 40% y un período de recuperación de cuatro años y seis meses para y un precio de la cerveza de 12 \$/L,

CONCLUSIONES

1. En la etapa de malteado, se obtienen valores de 32 % de humedad en el remojo y 51 % de granos germinados, lo que refleja resultados deficientes en el malteado, debido a la mala calidad del sorgo empleado.
2. En el proceso de maceración de la malta los mejores resultados se presentan para la mayor concentración de enzima y la mayor relación sólido-líquido.
3. El ajuste de la curva cinética de la maceración permitió con los grados Brix estimar el comportamiento de los azúcares reductores para cada experimento, los cuales difieren al final de la maceración con los reales en un rango de 0,1313 como promedio, resultando los valores más alejados en los que se trabajó con la menor cantidad de enzima.
4. De las cuatro variables independientes estudiadas en el proceso de obtención de cerveza a partir de malta de sorgo y con el empleo de enzimas durante la sacarificación, las variables más significativas en las variables respuesta principales seleccionadas (Consumo de ART, grado alcohólico, rendimiento) fueron la relación sólido/líquido, concentración de enzima Termamyl 120 L y la relación adjunto/malta, además de sus interrelaciones. Resultando el de mejores resultados el experimento 6 con los mayores niveles de las variables.
5. La variable concentración de inóculo no resultó tener influencia en el rango tan estrecho seleccionado, en ninguna de las variables respuesta.
6. En los dos experimentos adicionales, aumentando el tiempo de acción de la enzima en la maceración y empleando jarabe glucosado como adjunto, se obtuvieron resultados superiores a los del estudio llevado a cabo, siendo el de mejores resultados tanto en los azúcares reductores como en el grado alcohólico, el que emplea jarabe glucosado por ser este un jarabe con un alto contenido de glucosa.
7. Las propiedades organolépticas de las cervezas obtenidas compiten con las elaboradas por otros autores empleando los mismos sustratos y enzimas exógenas, aunque con un menor desarrollo del sabor y capacidad espumante que las elaboradas convencionalmente a partir de malta de cedada.
8. El análisis económico de la inversión de una planta de producción de malta y otra de cerveza a partir de sorgo para un precio de venta de 1,3 \$/kg la cerveza, la malta a

0,55 \$/kg y el afrecho a 0,40 \$/kg, no es rentable, dada la capacidad de la planta seleccionada de 100 L/día.

9. El análisis de sensibilidad realizado, ofrece indicadores dinámicos adecuados para un valor del precio de la cerveza de 12 \$/kg.

RECOMENDACIONES.

1. Continuar el estudio del efecto del NaOH en el malteado del sorgo, acotando los niveles de las variables estudiadas.
2. Realizar un estudio de la variación del Brix con los azúcares reductores para este tipo de sustrato que contiene almidones empleando para los ART los métodos de Eynon-Lane y el del 3-5 Dinitrosalicílico.
3. Utilizar durante la hidrólisis del almidón una concentración de enzima alfa amilasa mayor de 0.08 %, con un tiempo de acción de dos horas para una temperatura de 71 C para comprobar su efecto en la maceración
4. Realizar pruebas del contenido de minerales, proteínas, Nitrogeno alfa-amino (FAN) a las cervezas que se obtengan con las mejores relaciones estudiadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

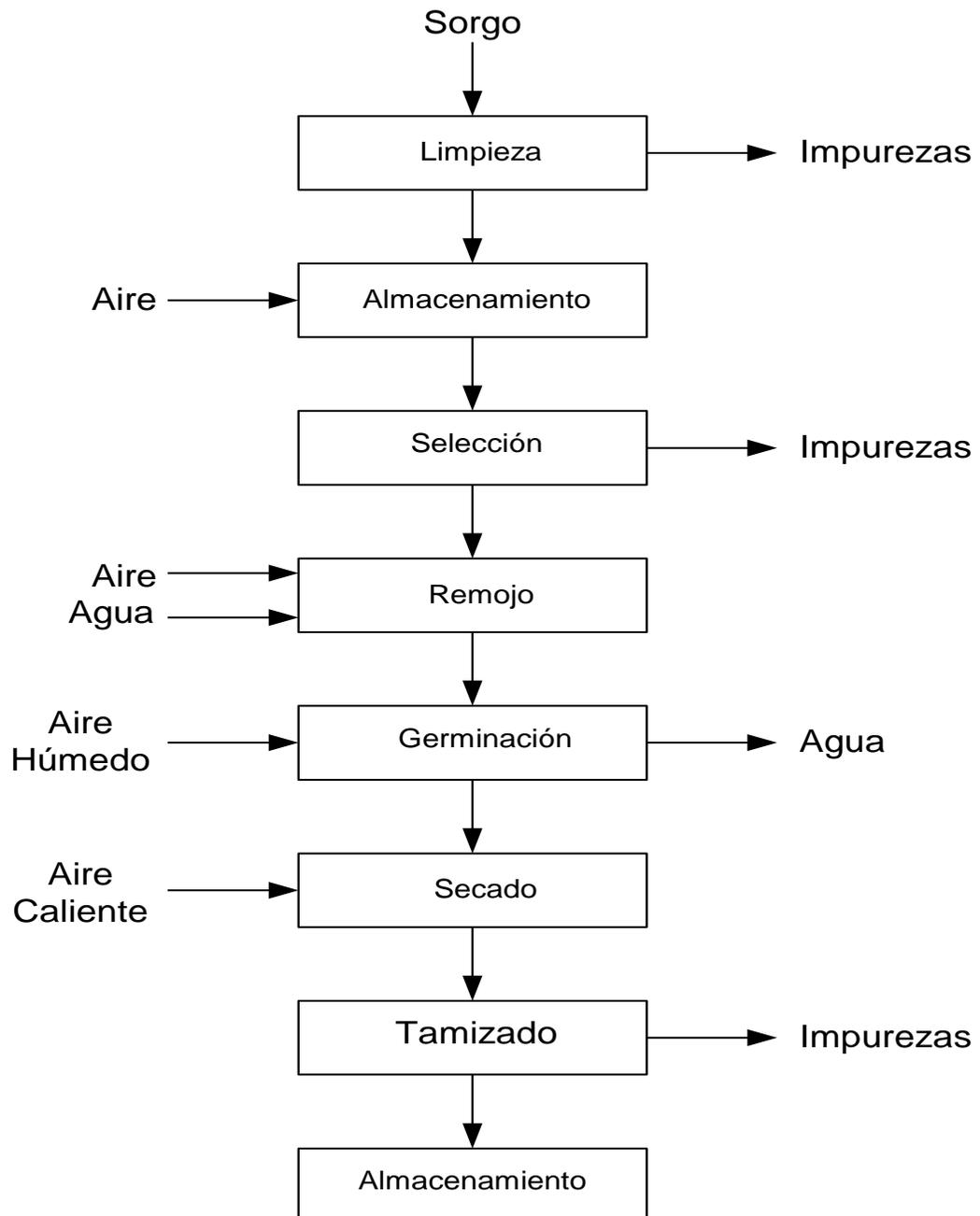
- AISIEN, A. O. & PALMER, G. H. 1983. The sorghum embryo in relation to the hydrolysis of the endosperm during germination and seedling growth. *J. Sci. Food Agric*, 34, 113-121.
- ALEMÁN, L. 2007. *Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- CARVAJAL, N. 2014. *Perfeccionamiento del proceso de producción de cerveza a partir de malta de sorgo*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- CEDEÑO, I. 2015. *Utilización integral del grano de sorgo para la obtención de etanol*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- DÍAZ, Y. 2014. *Perfeccionamiento del proceso de malteado de sorgo para la producción de maltinas para enfermos celíacos*. Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas
- FABELO, J. A. 1999. *Estudio de la etapa de fermentación alcohólica utilizando mezcla de diferentes sustratos*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- GALLARDO, I. 2012. Producción de bebidas usando sorgo malteado como materia prima para enfermos celíacos. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 61-73.
- GARCÍA & GARIBAY, M. 1994. Fermentación para la producción de cervezas. *Bebidas Mexicanas*, 3, 11.
- GONZÁLEZ, F. 2015. *Obtención de maltina a partir de sorgo malteado como materia prima fundamental*. Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- GOPAL, M. C. 2015. *Evaluación de riesgos tecnológicos y medioambientales en la empresa cervecera "Antonio Díaz Santana" de Manacas* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- HOSENEY, R. 1996. Principles of de Cereal. *Science and Technology*, 187-199.
- KERN, D. 1988. *"Procesos de Transferencia de Calor"*.
- LEFYEDI, M. L. & TAYLOR, J. R. N. 2006. Effect of dilute alkaline steeping on the microbial contamination, toxicity and diastatic power of sorghum malt. *J. Inst. Brew.*, 112, 108-116.
- LYMUGABE, F., GROS, J., NZUNGIZE, J., BAJYANA, E. & THONART, P. 2012. Characteristics of African traditional beers brewed with sorghum malt: a review. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 4, 509-530.
- M.MOLL 1991. Biéres. *Lavoisier Tec & Doc*.
- M.NELSON 2005. The Barbarian's Beverage: A History of Beer in Ancient Europe. *Routledge publication*, 1.
- MAOURA, N. & POURQUIE, J. 2009. Sorghum beer: production, nutritional value and impact upon human health., 53-60.

- MEDINA, J. 2015. *El sorgo, una opción en la producción de jarabes dextrinizados.*, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.
- NELLES, E. & TAYLOR, J. 2002. *Improvement in sorghum malting by a simple chemical treatment during steeping*, CSIR, Bio/Chemtek: Pretoria.
- NIEBLAS, C. 2015. *Análisis de la producción de almidón y jarabes glucosados a partir del sorgo para la industria alimenticia.* Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- NOVIELLE, L. 1966. Kaffircorn malting and brewing studies. Mashing with kaffircorn malt: Factors affecting sugar production. . *Journal of the Science of Food and Agriculture.*, 17, 354-361.
- NOVOZYMES 2007. Ficha de Informação do Produto.
- OGBEIDE, S. 2011. Investigating the Use of Sorghum as Malted Barley Adjunct in Brewing Process. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences.* 2, 521-524.
- OKOLO, B. N. & EZEUGU, L. I. 1996a. Duration of final warm water steep as a crucial factor in protein modification in sorghum malts. *J. Inst. Brew.*, 102, 167-177.
- OKOLO, B. N. & EZEUGU, L. I. 1996b. Duration of final warm water steep as a crucial factor in protein modification in sorghum malts. *J. Inst.*, 102, 167-177.
- OKUNGBOWA, J., OBETA, J. A. N. & EZEUGU, L. I. 2002. Sorghum β -amylase production: relationship with grain cultivar, steep regime, steep liquor composition and kilning temperature. *J. Inst. Brew.*, 108, 362-370.
- ORTEGA, M. 2001. *Elaboración de cerveza tipo lager a partir de malta y adjuntos cerveceros de sorgo.*, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- OWUAMA, C. I. & ASHENO, I. 1994. Studies on malting conditions for sorghum. *Food Chem.*, 49, 257-260.
- PALMER, G. 1989. Review: sorghum as brewing material. *Biotechnol.*, 265-275.
- PALMER, G. H., ETOKAKPAN, O. U. & IGOR, M. A. 1989. Review: sorghum as brewing material. *MIRCEN J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 5, 265-275.
- PATHIRANA, R. A., SHIVAYOGASUNDARAM, K. & JAYATISSA, P. M. 1983. Optimization of conditions for malting of sorghum. *J. Food Sci. Technol.*, 20, 108-112.
- PÉREZ CARRILLO, E. & SALDÍVAR, S. S. 2007. Effect of protease treatment before hydrolysis with alpha amylase on the rate of starch and protein hydrolysis of maize, whole sorghum and decorticated sorghum. *Cereal Chemistry*, 607-613.
- PÉREZ, M. T. 2016. *Pacientes celíacos.* [Online]. Available: www.saludceliacos.com [Accessed].
- PETERS, M. 1991. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers.*, United States.
- PIÑEDA, T. 2016. Alegría de comer sin gluten. *Vanguardia*, p.1.

- REED, J. D., TEDLA, A. & KEBEDE, Y. 1987. Phenolics, fibre and fibre digestibility in the crop residue from bird resistant and non-bird resistant sorghum varieties. *Sci Food Agric.*, 113-121.
- RODRÍGUEZ. 2005. *Estudio de la obtención de alcohol etílico a partir de sorgo.*, Universidad Central Martha Abreu de las Villas.
- ROSABAL, J. & V., M. 1989. "*Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas.*".
- SERNA, S. 2005. *Bioconversión de almidones en jarabes dextrinizados, maltosados, glucosados y fructosados.* Uruguay.
- ULRICH, G. 1985. "*Diseño y Ecomía de los Procesos de Ingeniería Química.*".
- VALENZUELA, R. 2007. *Elaboración artesanal de cerveza orgánica de quinoa.*, Univarsidad de Chile.
- VICENTE, F. 2013. Bebida fermentada a base de sorgo. *Desarrollo de nuevos productos.*

Anexos

Anexo 1: Etapas que constituyen el proceso de malteado.



Anexo 2: Determinación de la Humedad

Fundamento del método

La determinación de la humedad por este método se basa en la diferencia de pesadas después de estar expuesta la muestra a la deshidratación. **(MACU, 1986)**.

Procedimiento

1. Se pesan aproximadamente 5 g de la muestra que se va a analizar y se introducen en una cápsula previamente tarada.
2. Se coloca la cápsula en una estufa a 100 ° C durante 1 h.
3. Se coloca la muestra en la desecadora para que se enfríe, y luego se pesa.
4. El procedimiento se repite hasta que el peso sea constante.

Cada determinación de humedad debe realizarse con una réplica.

Expresión de los resultados

$$\text{Humedad} = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i - P_c} \right) * 100$$

Donde:

A – Peso de la cápsula más el peso de la muestra.

B – Peso constante final

C – Peso de la cápsula

Anexo 3: Técnica de laboratorio para la determinación del contenido de extracto.

Las muestras de 6.0 g molidas se incuban en 54 ml con agua destilada en tubos de centrifugas con cierre hermético a 60°C por 2 h., a intervalos de 10 min, el contenido de los tubos es mezclado por inversión. Después de la incubación, los tubos son enfriados en agua (20–23°C) por 30 min, y centrifugados a 1,500 rev por 2 min. Se extrae 40 ml del sobrenadante claro y se transfiere a un beaker de 50 mL. La gravedad específica se mide por métodos gravimétricos el cual se pesan un picnómetro vacío, con agua y con solución para emplear la fórmula siguiente

$$S = 0.99913 * \frac{C - A}{B - A}$$

Donde

A: peso picnómetro vacío.

B: peso picnómetro con agua destilada.

C: peso picnómetro con la solución.

El extracto se calcula como un porcentaje en peso y se determina por la tabla de platos.

Anexo 4: Tabla de platos para el contenido de extractos.

Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución	Gravedad Específica 20°C/20°C	g Extracto en 100 g Solución
1.00000	0.000	1.00280	0.642	1.00500	1.283	1.00760	1.923
1.00005	0.013	1.00255	0.655	1.00505	1.286	1.00755	1.935
1.00010	0.026	1.00260	0.668	1.00510	1.308	1.00760	1.948
1.00015	0.039	1.00265	0.680	1.00515	1.321	1.00765	1.961
1.00020	0.052	1.00270	0.693	1.00520	1.334	1.00770	1.973
1.00025	0.064	1.00275	0.706	1.00525	1.347	1.00775	1.986
1.00030	0.077	1.00280	0.719	1.00530	1.360	1.00780	1.999
1.00035	0.090	1.00285	0.732	1.00535	1.372	1.00785	2.012
1.00040	0.103	1.00290	0.745	1.00540	1.385	1.00790	2.025
1.00045	0.116	1.00295	0.757	1.00545	1.388	1.00795	2.038
1.00050	0.129	1.00300	0.770	1.00550	1.411	1.00800	2.051
1.00055	0.141	1.00305	0.783	1.00555	1.424	1.00805	2.065
1.00060	0.154	1.00310	0.796	1.00560	1.437	1.00810	2.078
1.00065	0.167	1.00315	0.809	1.00565	1.450	1.00815	2.090
1.00070	0.180	1.00320	0.821	1.00570	1.462	1.00820	2.102
1.00075	0.193	1.00325	0.834	1.00575	1.475	1.00825	2.114
1.00080	0.206	1.00330	0.847	1.00580	1.488	1.00830	2.127
1.00085	0.219	1.00335	0.859	1.00585	1.501	1.00835	2.139
1.00090	0.231	1.00340	0.872	1.00590	1.514	1.00840	2.152
1.00095	0.244	1.00345	0.885	1.00595	1.528	1.00845	2.165
1.00100	0.257	1.00350	0.898	1.00600	1.539	1.00850	2.178
1.00105	0.270	1.00355	0.911	1.00605	1.552	1.00855	2.191
1.00110	0.283	1.00360	0.924	1.00610	1.565	1.00860	2.203
1.00115	0.296	1.00365	0.937	1.00615	1.578	1.00865	2.216
1.00120	0.309	1.00370	0.949	1.00620	1.590	1.00870	2.228
1.00125	0.321	1.00375	0.962	1.00625	1.603	1.00875	2.241
1.00130	0.334	1.00380	0.975	1.00630	1.616	1.00880	2.254
1.00135	0.347	1.00385	0.988	1.00635	1.629	1.00885	2.267
1.00140	0.360	1.00390	1.001	1.00640	1.642	1.00890	2.280
1.00145	0.373	1.00395	1.014	1.00645	1.655	1.00895	2.292
1.00150	0.386	1.00400	1.026	1.00650	1.668	1.00900	2.305
1.00155	0.398	1.00405	1.039	1.00655	1.681	1.00905	2.317
1.00160	0.411	1.00410	1.052	1.00660	1.694	1.00910	2.330
1.00165	0.424	1.00415	1.065	1.00665	1.705	1.00915	2.343
1.00170	0.437	1.00420	1.078	1.00670	1.718	1.00920	2.356
1.00175	0.450	1.00425	1.090	1.00675	1.731	1.00925	2.369
1.00180	0.463	1.00430	1.103	1.00680	1.744	1.00930	2.381
1.00185	0.476	1.00435	1.116	1.00685	1.757	1.00935	2.394
1.00190	0.488	1.00440	1.129	1.00690	1.769	1.00940	2.407
1.00195	0.501	1.00445	1.142	1.00695	1.782	1.00945	2.419
1.00200	0.514	1.00450	1.155	1.00700	1.795	1.00950	2.432
1.00205	0.527	1.00455	1.168	1.00705	1.807	1.00955	2.445
1.00210	0.540	1.00460	1.180	1.00710	1.820	1.00960	2.458
1.00215	0.552	1.00465	1.193	1.00715	1.833	1.00965	2.470
1.00220	0.565	1.00470	1.206	1.00720	1.846	1.00970	2.483
1.00225	0.578	1.00475	1.219	1.00725	1.859	1.00975	2.496
1.00230	0.591	1.00480	1.232	1.00730	1.872	1.00980	2.508
1.00235	0.604	1.00485	1.244	1.00735	1.884	1.00985	2.521
1.00240	0.616	1.00490	1.257	1.00740	1.897	1.00990	2.534
1.00245	0.629	1.00495	1.270	1.00745	1.910	1.00995	2.547

Anexo 5: Carta Tecnológica para la elaboración de cerveza 70 % malta y 30 % adjunto.

CARTA TECNOLÓGICA.

CERVEZA 70% DE MALTA Y 30% DE AZÚCAR

MACERADOR

MALTA PILSEN..... 4000 KGS

AGUA..... 150 HLS

- ✓ Bajar la masa a 38° C en 15 minutos. Mantener ½ horas.
- ✓ Subir a 51° C en 15 minutos. Mantener ½ horas.
- ✓ Subir a 63° C en 10 minutos. Mantener 45 minutos.
- ✓ Subir a 71° C en 15 minutos. Mantener 40 minutos.

HACER PRUEBA DE SACARIFICACIÓN. (Yodo)

Subir a 78° C en 10 minutos. Bombear a la tina.

TACHO:

- Llenar a 310 HLS.
- Hervir durante 2 horas.
- Bombear a 300 HLS y aproximadamente 12° p (grados platos).

Azúcar Refino: 1300 KGS----- 26 Sacos

Lúpulo:

1. - Añadir 10 KGS de lúpulo amargo peletizado, después de romper la hervidura.
2. - Añadir 10 KGS de lúpulo aromático peletizado 30 minutos antes de bombearse.

Anexo 6: Carta Tecnológica para la elaboración de cerveza 50 % malta y 50 % adjunto.

CERVEZA 50% DE MALTA Y 50% DE AZÚCAR

MACERADOR

MALTA PILSEN..... 3160 KGS

AGUA..... 120 HLS

- ✓ Bajar la masa a 38° C en 15 minutos. Mantener ½ horas.
- ✓ Subir a 51° C en 15 minutos. Mantener ½ horas.
- ✓ Subir a 71° C en 15 minutos. Mantener 40 minutos.

HACER PRUEBA DE SACARIFICACIÓN. (Yodo)

Subir a 78° C en 10 minutos. Bombear a la tina.

TACHO:

- Llenar a 340 HLS.
- Hervir durante 2 horas.
- Bombear a 330 HLS y aproximadamente 16° p(grados platos)

Azúcar Refino: 3150 KGS ----- 63 Sacos.

Lúpulo Peletizado:

1. - Añadir 10 KGS de lúpulo amargo peletizado, después de romper la hervidura.
2. - Añadir 10 KGS de lúpulo aromático peletizado 30 minutos antes de bombearse.

Anexo 7: Determinación de ART.

Fundamento del método

Este se basa en la relación lineal que existe entre la absorbancia y la concentración según la ley de Lamber-Beer, siendo la absorbancia medida proporcional a la concentración de azúcares reductores presentes en la muestra.

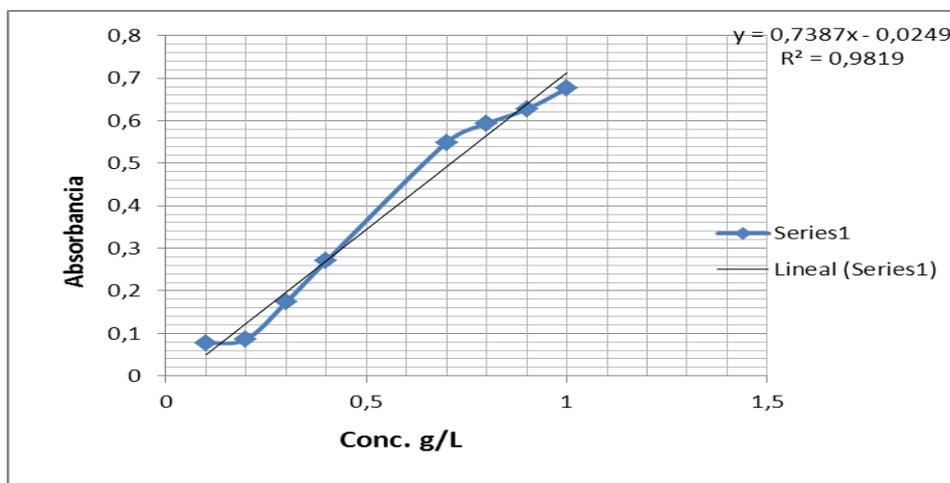
Procedimiento

1. Se añade a un tubo de ensayo 1 mL del sobrenadante centrifugado y se añaden 2 mL de la solución de reactivo 3,5 – Dinitrosalicílico mezclando bien.
2. Se colocan los tubos de ensayo en baño de agua hirviendo durante 5 minutos, extrayéndose posteriormente y dejándose enfriar hasta temperatura ambiente.
3. Se enrasan todos los tubos de ensayo hasta 10 mL con agua destilada y se lee en el espectrofotocolorímetro a 540 nm contra un blanco preparado con 1 mL de agua destilada el cual debe sufrir la misma técnica operatoria. **(Herrera A. 1989)**. Las lecturas se realizaron en diluciones de uno en cien mililitros.

Para la confección de la curva de calibración se prepararon 10 soluciones a diferentes concentraciones de glucosa, midiéndose la absorbancia de las mismas, obteniéndose el siguiente resultado:

C(g/L)	0,1	0,077	0,1	0,077	0,1	0,077	0,1	0,077	0,1	0,077
A	0,2	0,086	0,2	0,086	0,2	0,086	0,2	0,086	0,2	0,086

Curva de calibración.



Anexo 8: Determinación del Brix.**Fundamento del método**

Al atravesar un rayo de luz dos medios diferentes, el primero experimenta una variación en su trayectoria en un cierto ángulo, llamándosele a esta desviación refracción.

El índice de refracción varía con la temperatura, con la longitud de onda y con la concentración de sólidos solubles presentes.(MACU, 1986).

Expresión de resultados

La lectura anotada es el valor que corresponde al °Bx de la muestra, expresado en %.

Anexo 9: Determinación del Grado alcohólico.

Método Picnométrico

Se toman 100 ml de fermento, más 50 ml de agua destilada y ambos son adicionados a un balón, se calienta y se hace que la mezcla ebulle, a través de un condensador, se recoge un volumen de 50 ml de destilado en un matraz de 100 ml y se enrasa con agua destilada.

Con este producto se procede a realizar los análisis de medición del grado alcohólico que consiste en realizar un conjunto de pesadas al picnómetro, vacío, con agua destilada y hervida, y con el destilado. Entonces a través de la fórmula se obtiene la gravedad específica y con ese valor se va a la tabla "Determinación del alcohol en volumen y en peso por ciento según K. Windish, a 15 °C" donde se obtiene el valor del grado °GL

Todo el procedimiento se realizó a 15 °C pues a esa temperatura es a la que viene referido el valor del grado alcohólico.

$$S = 0.99913(C - A)/(B - A)$$

Donde:

S - gravedad relativa

A – peso del picnómetro vacío

B – peso del picnómetro con el agua destilada y hervida

C – peso del picnómetro con el destilado

Anexo 10: Tabla para la determinación del grado alcohólico por picnometría.

TABLA E. — Determinación del alcohol en volumen y en peso por centos según K. WINDSCH, a 15° C.

Peso es- perado d_{15}^{15}	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Tramos de alcohol en volumen por 100 c.c.	Peso es- perado d_{15}^{15}	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Tramos de alcohol en volumen por 100 c.c.	Peso es- perado d_{15}^{15}	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Tramos de alcohol en volumen por 100 c.c.	Peso es- perado d_{15}^{15}	Alcohol en peso por 100	Alcohol en volumen por 100	Tramos de alcohol en volumen por 100 c.c.
1.0000	0.00	0.00	0.00	0.9955	2.45	3.07	2.43	0.9910	4.90	6.18	4.87	0.9865	7.35	9.12	7.50
0.9995	0.35	0.38	0.35	0.9905	2.75	3.42	2.72	0.9855	7.65	9.50	7.85	0.9810	10.10	12.35	10.40
0.9990	0.65	0.67	0.65	0.9895	3.05	3.77	3.02	0.9845	7.95	9.85	8.15	0.9800	10.45	12.70	10.70
0.9985	0.95	1.00	0.95	0.9890	3.35	4.12	3.32	0.9840	8.25	10.20	8.50	0.9795	10.80	13.05	11.05
0.9980	1.25	1.33	1.25	0.9885	3.65	4.47	3.62	0.9835	8.55	10.55	8.85	0.9790	11.15	13.40	11.40
0.9975	1.55	1.68	1.55	0.9880	3.95	4.82	3.92	0.9830	8.85	10.90	9.20	0.9785	11.50	13.75	11.75
0.9970	1.85	2.02	1.85	0.9875	4.25	5.17	4.22	0.9825	9.15	11.25	9.55	0.9780	11.85	14.10	12.10
0.9965	2.15	2.37	2.15	0.9870	4.55	5.52	4.52	0.9820	9.45	11.60	9.90	0.9775	12.20	14.45	12.45
0.9960	2.45	2.72	2.45	0.9865	4.85	5.87	4.82	0.9815	9.75	11.95	10.25	0.9770	12.55	14.80	12.80
0.9955	2.75	3.07	2.75	0.9860	5.15	6.22	5.12	0.9810	10.05	12.30	10.60	0.9765	12.90	15.15	13.15
0.9950	3.05	3.42	3.05	0.9855	5.45	6.57	5.42	0.9805	10.35	12.65	10.95	0.9760	13.25	15.50	13.50
0.9945	3.35	3.77	3.35	0.9850	5.75	6.92	5.72	0.9800	10.65	13.00	11.30	0.9755	13.60	15.85	13.85
0.9940	3.65	4.12	3.65	0.9845	6.05	7.27	6.02	0.9795	10.95	13.35	11.65	0.9750	13.95	16.20	14.20
0.9935	3.95	4.47	3.95	0.9840	6.35	7.62	6.32	0.9790	11.25	13.70	12.00	0.9745	14.30	16.55	14.55
0.9930	4.25	4.82	4.25	0.9835	6.65	7.97	6.62	0.9785	11.55	14.05	12.35	0.9740	14.65	16.90	14.90
0.9925	4.55	5.17	4.55	0.9830	6.95	8.32	6.92	0.9780	11.85	14.40	12.70	0.9735	15.00	17.25	15.25
0.9920	4.85	5.52	4.85	0.9825	7.25	8.67	7.22	0.9775	12.15	14.75	13.05	0.9730	15.35	17.60	15.60
0.9915	5.15	5.87	5.15	0.9820	7.55	9.02	7.52	0.9770	12.45	15.10	13.40	0.9725	15.70	17.95	15.95
0.9910	5.45	6.22	5.45	0.9815	7.85	9.37	7.82	0.9765	12.75	15.45	13.75	0.9720	16.05	18.30	16.30
0.9905	5.75	6.57	5.75	0.9810	8.15	9.72	8.12	0.9760	13.05	15.80	14.10	0.9715	16.40	18.65	16.65
0.9900	6.05	6.92	6.05	0.9805	8.45	10.07	8.42	0.9755	13.35	16.15	14.45	0.9710	16.75	19.00	17.00
0.9895	6.35	7.27	6.35	0.9800	8.75	10.42	8.72	0.9750	13.65	16.50	14.80	0.9705	17.10	19.35	17.35
0.9890	6.65	7.62	6.65	0.9795	9.05	10.77	9.02	0.9745	13.95	16.85	15.15	0.9700	17.45	19.70	17.70
0.9885	6.95	7.97	6.95	0.9790	9.35	11.12	9.32	0.9740	14.25	17.20	15.50	0.9695	17.80	20.05	18.05
0.9880	7.25	8.32	7.25	0.9785	9.65	11.47	9.62	0.9735	14.55	17.55	15.85	0.9690	18.15	20.40	18.40
0.9875	7.55	8.67	7.55	0.9780	9.95	11.82	9.92	0.9730	14.85	17.90	16.20	0.9685	18.50	20.75	18.75
0.9870	7.85	9.02	7.85	0.9775	10.25	12.17	10.22	0.9725	15.15	18.25	16.55	0.9680	18.85	21.10	19.10
0.9865	8.15	9.37	8.15	0.9770	10.55	12.52	10.52	0.9720	15.45	18.60	16.90	0.9675	19.20	21.45	19.45
0.9860	8.45	9.72	8.45	0.9765	10.85	12.87	10.82	0.9715	15.75	18.95	17.25	0.9670	19.55	21.80	19.80
0.9855	8.75	10.07	8.75	0.9760	11.15	13.22	11.12	0.9710	16.05	19.30	17.60	0.9665	19.90	22.15	20.15
0.9850	9.05	10.42	9.05	0.9755	11.45	13.57	11.42	0.9705	16.35	19.65	17.95	0.9660	20.25	22.50	20.50
0.9845	9.35	10.77	9.35	0.9750	11.75	13.92	11.72	0.9700	16.65	20.00	18.30	0.9655	20.60	22.85	20.85
0.9840	9.65	11.12	9.65	0.9745	12.05	14.27	12.02	0.9695	16.95	20.35	18.65	0.9650	20.95	23.20	21.20
0.9835	9.95	11.47	9.95	0.9740	12.35	14.62	12.32	0.9690	17.25	20.70	19.00	0.9645	21.30	23.55	21.55
0.9830	10.25	11.82	10.25	0.9735	12.65	14.97	12.62	0.9685	17.55	21.05	19.35	0.9640	21.65	23.90	21.90
0.9825	10.55	12.17	10.55	0.9730	12.95	15.32	12.92	0.9680	17.85	21.40	19.70	0.9635	22.00	24.25	22.25
0.9820	10.85	12.52	10.85	0.9725	13.25	15.67	13.22	0.9675	18.15	21.75	20.05	0.9630	22.35	24.60	22.60
0.9815	11.15	12.87	11.15	0.9720	13.55	16.02	13.52	0.9670	18.45	22.10	20.40	0.9625	22.70	24.95	22.95
0.9810	11.45	13.22	11.45	0.9715	13.85	16.37	13.82	0.9665	18.75	22.45	20.75	0.9620	23.05	25.30	23.30
0.9805	11.75	13.57	11.75	0.9710	14.15	16.72	14.12	0.9660	19.05	22.80	21.10	0.9615	23.40	25.65	23.65
0.9800	12.05	13.92	12.05	0.9705	14.45	17.07	14.42	0.9655	19.35	23.15	21.45	0.9610	23.75	26.00	24.00
0.9795	12.35	14.27	12.35	0.9700	14.75	17.42	14.72	0.9650	19.65	23.50	21.80	0.9605	24.10	26.35	24.35
0.9790	12.65	14.62	12.65	0.9695	15.05	17.77	15.02	0.9645	19.95	23.85	22.15	0.9600	24.45	26.70	24.70
0.9785	12.95	14.97	12.95	0.9690	15.35	18.12	15.32	0.9640	20.25	24.20	22.50	0.9595	24.80	27.05	25.05
0.9780	13.25	15.32	13.25	0.9685	15.65	18.47	15.62	0.9635	20.55	24.55	22.85	0.9590	25.15	27.40	25.40
0.9775	13.55	15.67	13.55	0.9680	15.95	18.82	15.92	0.9630	20.85	24.90	23.20	0.9585	25.50	27.75	25.75
0.9770	13.85	16.02	13.85	0.9675	16.25	19.17	16.22	0.9625	21.15	25.25	23.55	0.9580	25.85	28.10	26.10
0.9765	14.15	16.37	14.15	0.9670	16.55	19.52	16.52	0.9620	21.45	25.60	23.90	0.9575	26.20	28.45	26.45
0.9760	14.45	16.72	14.45	0.9665	16.85	19.87	16.82	0.9615	21.75	25.95	24.25	0.9570	26.55	28.80	26.80
0.9755	14.75	17.07	14.75	0.9660	17.15	20.22	17.12	0.9610	22.05	26.30	24.60	0.9565	26.90	29.15	27.15
0.9750	15.05	17.42	15.05	0.9655	17.45	20.57	17.42	0.9605	22.35	26.65	24.95	0.9560	27.25	29.50	27.50
0.9745	15.35	17.77	15.35	0.9650	17.75	20.92	17.72	0.9600	22.65	27.00	25.30	0.9555	27.60	29.85	27.85
0.9740	15.65	18.12	15.65	0.9645	18.05	21.27	18.02	0.9595	22.95	27.35	25.65	0.9550	27.95	30.20	28.20
0.9735	15.95	18.47	15.95	0.9640	18.35	21.62	18.32	0.9590	23.25	27.70	26.00	0.9545	28.30	30.55	28.55
0.9730	16.25	18.82	16.25	0.9635	18.65	21.97	18.62	0.9585	23.55	28.05	26.35	0.9540	28.65	30.90	28.90
0.9725	16.55	19.17	16.55	0.9630	18.95	22.32	18.92	0.9580	23.85	28.40	26.70	0.9535	29.00	31.25	29.25
0.9720	16.85	19.52	16.85	0.9625	19.25	22.67	19.22	0.9575	24.15	28.75	27.05	0.9530	29.35	31.60	29.60
0.9715	17.15	19.87	17.15	0.9620	19.55	23.02	19.52	0.9570	24.45	29.10	27.40	0.9525	29.70	31.95	29.95
0.9710	17.45	20.22	17.45	0.9615	19.85	23.37	19.82	0.9565	24.75	29.45	27.75	0.9520	30.05	32.30	30.30
0.9705	17.75	20.57	17.75	0.9610	20.15	23.72	20.12	0.9560	25.05	29.80	28.10	0.9515	30.40	32.65	30.65
0.9700	18.05	20.92	18.05	0.9605	20.45	24.07	20.42	0.9555	25.35	30.15	28.45	0.9510	30.75	33.00	31.00
0.9695	18.35	21.27	18.35	0.9600	20.75	24.42	20.72	0.9550	25.65	30.50	28.80	0.9505	31.10	33.35	31.35
0.9690	18.65	21.62	18.65	0.9595	21.05	24.77	21.02	0.9545	25.95	30.85	29.15	0.9500	31.45	33.70	31.70
0.9685	18.95	21.97	18.95	0.9590	21.35	25.12	21.32	0.9540	26.25	31.20	29.50	0.9495	31.80	34.05</	

Anexo11: Determinaciones experimentales de los Brix durante la maceración.

Temp(°C)	Tiempo (min)	Exp.1	Exp.2	Exp.3	Exp.4	Exp.5	Exp.6	Exp.7	Exp.8	Exp.9	Exp.10
38	40	1,2	0,1	1,1	15	0,1	1,2	0,5	1,1	1,1	0,5
55	80	2	1,5	1,9	2,5	15	2	1	1,9	1,9	1
63	120	2,6	2	2,1	3	2	2,6	2	2,1	2,1	2
71	150	3,5	4	3,2	3,9	4	3,5	3,1	3,2	3,2	3,1
71	180	5,5	5,1	4,6	4,1	5,1	5,5	4,2	4,6	4,6	4,2

Anexo 12: Determinación de la acidez.Determinación de la acidez total en las maltinas (Método por titulación con fenolftaleína)**Objetivo y alcance**

Este método se establece para determinar la acidez total

Fundamento del método

El método se basa en la neutralización de las funciones ácidas titulables del producto, mediante la adición de un hidróxido alcalina, en presencia de un indicador de neutralización, cuyo cambio de color evidencia el punto final de la reacción.

Equipos

Vaso o erlenmeyer de vidrio, de 500 cm³.

Pipeta, de 25 cm³ ± 0,1 cm³, tipo flujo rápido.

Bureta.

Reactivos

Solución de fenolftaleína, 0,5% en 95% de alcohol etílico.

Solución estándar de hidróxido de sodio, 0,1 N.

Reactivos químicos

Solución de hidróxido de sodio, 0,1 N.

Fenolftaleína, solución al 0,5% en etanol.

Preparación de la muestra de ensayo**Procedimiento**

Se pone a hervir 250 ml de agua destilada en un frasco cónico de 500 ml y se mantiene hirviendo por dos minutos más, después de comenzar la ebullición. Después se adiciona mediante pipeta 1 ml si es oscura. Se continúa el calentamiento por un minuto, regulando el calor de modo que la ebullición se produzca en los 30 segundos finales.

Se retira del calor, se agita por 5 segundos y se enfría a temperatura ambiente. Se adicionan 0,5 ml de la solución indicadora de fenolftaleína y se valora con la solución de hidróxido de sodio hasta la aparición del color rosado permanente.

Método para los cálculos

La acidez total se calcula por la fórmula siguiente:

$$At = \frac{((v_1 - v_0) * N)}{V} \times \text{gravedad específica de la cerveza}] \times 0,09$$

Donde

At acidez total (ml NaOH 0,1 N/100 ml de muestra)

V₁- volumen de solución de hidróxido de sodio consumidos en la valoración de la muestra (ml)

V₀ - volumen de solución de hidróxido de sodio consumido en la valoración del blanco (ml)

N- normalidad de la solución de hidróxido de sodio

V - volumen de la muestra utilizada en el ensayo (ml)

0,09 = cm³ equivalentes de una solución de ácido láctico 1,0 N

Anexo 13: Determinación del ph.**Fundamento del método**

El término pH es la forma de expresar la mayor o menor acidez de una solución en función de la actividad de los iones hidrógeno. La determinación se basa en medir el cambio en la concentración hidrogeniónica mediante una variación en el voltaje detectado por los electrodos del equipo.(MACU, 1986).

Expresión de resultados

La lectura anotada es el valor del pH de la muestra.

Anexo 14: Análisis de varianza y efectos estimados de cada variable respuesta en la obtención de cerveza usando integralmente el grano de sorgo.

Tabla 1. Efectos estimados para el Consumo de ART.

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	19,0875	0,773171	
A:Rel SL	14,89	1,72886	1,0
B:C En	12,9825	1,72886	1,0
C:Rel Adj	0,365	1,72886	1,0
AB	-0,5	1,72886	1,0
AC	3,7075	1,72886	1,0
BC	-3,85	1,72886	1,0
bloque	0,919	1,54634	1,0

Tabla 2. Análisis de Varianza para Consumo de ART.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Rel SL	886.848	1	886.848	74.18	0.0000
B:C En	674.181	1	674.181	56.39	0.0000
C:Rel Adj	0.5329	1	0.5329	0.04	0.8363
AB	1.0	1	1.0	0.08	0.7774
AC	54.9822	1	54.9822	4.60	0.0532
BC	59.29	1	59.29	4.96	0.0459
bloques	4.2228	1	4.2228	0.35	0.5633
Error total	143.47	12	11.9559		
Total (corr.)	1824.53	19			

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de Consumo de ART en piezas separadas para cada uno de los efectos. entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 92.1366% de la variabilidad en Consumo de ART. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88.5073%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 3.45773. El error medio absoluto (MAE) de 1.9038 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Tabla 3. Efectos estimados para Grado Alcohólico (% volumen).

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	2.6025	0.0775734	
A:Rel SL	1.32625	0.173459	1.0
B:C En	0.86375	0.173459	1.0
C:Rel Adj	0.65375	0.173459	1.0
AB	-0.10625	0.173459	1.0
AC	0.67375	0.173459	1.0
BC	-0.06375	0.173459	1.0
bloque	-0.199	0.155147	1.0

Tabla 4. Análisis de Varianza para Grado Alcohólico.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Rel SL	7.03576	1	7.03576	58.46	0.0000
B:C En	2.98426	1	2.98426	24.80	0.0003
C:Rel Adj	1.70956	1	1.70956	14.20	0.0027
AB	0.0451563	1	0.0451563	0.38	0.5516
AC	1.81576	1	1.81576	15.09	0.0022
BC	0.0162562	1	0.0162562	0.14	0.7196
bloques	0.198005	1	0.198005	1.65	0.2238
Error total	1.44423	12	0.120353		
Total (corr.)	15.249	19			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 90.529% de la variabilidad en Grado A. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 86.1577%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.346919. El error medio absoluto (MAE) de 0.207375 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia.

Tabla 5. Efectos estimados para la Productividad (g/L h).

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	0.50739	0.0481133	
A:Rel SL	0.20785	0.107585	1.0
B:C En	-0.3024	0.107585	1.0
C:Rel Adj	-0.2084	0.107585	1.0
AB	-0.17565	0.107585	1.0
AC	0.11685	0.107585	1.0
BC	-0.1724	0.107585	1.0
bloque	0.10142	0.0962265	1.0

Tabla 6. Análisis de Varianza para la Productividad.

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Rel SL	0.172806	1	0.172806	3.73	0.0773
B:C En	0.365783	1	0.365783	7.90	0.0157
C:Rel Adj	0.173722	1	0.173722	3.75	0.0766
AB	0.123412	1	0.123412	2.67	0.1285
AC	0.0546157	1	0.0546157	1.18	0.2988
BC	0.118887	1	0.118887	2.57	0.1350
bloques	0.0514301	1	0.0514301	1.11	0.3127
Error total	0.555573	12	0.0462977		

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 65.6254% de la variabilidad en Productividad. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 49.7602%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.215169. El error medio absoluto (MAE) de 0.137485 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Tabla 7. Efectos estimados para Rendimiento (%).

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	48.4385	1.44601	
A:Rel SL	3.975	3.23338	1.0
B:C En	6.4225	3.23338	1.0
C:Rel Adj	7.7225	3.23338	1.0
AB	-0.73	3.23338	1.0
AC	0.945	3.23338	1.0
BC	11.2075	3.23338	1.0
bloque	0.365	2.89202	1.0

Tabla 8. Análisis de Varianza para Rendimiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Rel SL	63.2025	1	63.2025	1.51	0.2425
B:C En	164.994	1	164.994	3.95	0.0703
C:Rel Adj	238.548	1	238.548	5.70	0.0342
AB	2.1316	1	2.1316	0.05	0.8252
AC	3.5721	1	3.5721	0.09	0.7751
BC	502.432	1	502.432	12.01	0.0047
bloques	0.666125	1	0.666125	0.02	0.9017
Error total	501.828	12	41.819		
Total (corr.)	1477.37	19			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 66.0325% de la variabilidad en el Rendimiento. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 50.3551%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 6.46676. El error medio absoluto (MAE) de 3.0751 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

Tabla 9. Efectos estimados para el Tiempo de Fermentación.

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
promedio	43.25	2.37331	
A:Rel SL	-26.875	5.30688	1.0
B:C En	5.375	5.30688	1.0
C:Rel Adj	2.625	5.30688	1.0
AB	7.375	5.30688	1.0
AC	-5.875	5.30688	1.0
BC	1.875	5.30688	1.0
bloque	-3.1	4.74662	1.0

Tabla 10. Análisis de Varianza para el Tiempo Fermentación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Rel SL	2889.06	1	2889.06	25.65	0.0003
B:C En	115.563	1	115.563	1.03	0.3311
C:Rel Adj	27.5625	1	27.5625	0.24	0.6298
AB	217.563	1	217.563	1.93	0.1899

AC	138.063	1	138.063	1.23	0.2900
BC	14.0625	1	14.0625	0.12	0.7300
bloques	48.05	1	48.05	0.43	0.5260
Error total	1351.83	12	112.652		
Total (corr.)	4801.75	19			

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 71.8472% de la variabilidad en Tiempo F. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 58.8537%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 10.6138. El error medio absoluto (MAE) de 5.7 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5.0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5.0%.

