

# Universidad de Matanzas

## Camilo Cienfuegos

Facultad de Ingenierías



## *Trabajo de Diploma*

**TÍTULO:** POSIBILIDADES DE UTILIZACIÓN DEL BAGAZO DE MALTA (AFRECHO) COMO MATERIA PRIMA EN LA OBTENCIÓN DE UNA BEBIDA CON CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS SIMILARES A LA CERVEZA.

**Autor:** Marc-Donald Siméus

**Tutores:** Dr Sc. Mario Yll Lavin

Dr. Marcelo Marcet Enrique Sánchez

Matanzas, Cuba 2011.

*Quiero dedicar mi trabajo de diploma a todas aquellas personas que realmente me quieren, principalmente:*

*A mi padre por ser la razón de mi existencia.*

*A mis hermanos y hermanas.*

*A mi novia por ser tan buena conmigo.*

*Yo quiero darle gracias a Dios sobretodo por la fortaleza necesaria que me ha dado para permitirme realizar parte de mis sueños.*

- *La Revolución Cubana ya que gracias a ella me he forjado como un verdadero Ingeniero Químico.*
- *Mis padres por ser los progenitores de este conocimiento que tengo.*
- *Al senador de la república de Haití Riché Andrice.*
- *A mis tutores Dr.Sc. Mario Yll Lavin y Dr. Marcelo Enrique Marcet Sánchez, por las orientaciones ofrecidas, sus criterios y consejos útiles, en los cuales de su satisfacción ver la culminación de este trabajo.*
- *A todos los profesores de mi carrera que han sabido encaminarme por el camino del saber y del bien.*
- *A Natasha Lauren Gallagher por su comprensión y su cariño.*
- *A mis compañeros de grupo que durante los cinco años de carrera me han ayudado y comprendido, pero de forma especial a mi amigo Roberto Triana Figueroa.*

*A TODOS DESDE LO MÁS PROFUNDO DE MI CORAZÓN*

*GRACIAS MUCHÍSIMAS GRACIAS*

### **Declaración de Autoridad**

Yo, Marc-Donald Siméus, declaro ser el único autor de este Trabajo de Diploma titulado *“Obtención de una bebida alcohólica a partir del bagazo de malta”* con el fin de optar por el título de Ingeniero Químico. Es necesario señalar que la idea básica de esta investigación surge a partir del resultado de un proyecto de la Planta de Alcoholes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas y del IIIA. Según las facultades que me están conferidas, autorizo a la Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos” a hacer uso del mismo, tanto en ella como en cualquier otra institución del país con la finalidad que se estime necesario.

**Nota de Aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Miembro del Tribunal**

---

**Miembro del Tribunal**

---

**Miembro del Tribunal**

## ***Resumen***

Este trabajo consistió en darle un nuevo uso al bagazo de malta que es un residual de la industria cervecera. Para esto se utilizó el residual proveniente de la Planta de Alcoholes de la Universidad de Matanzas; y debido a sus características se eligió una materia prima que es el jugo de caña que conducirá a la obtención de una nueva bebida alcohólica con características organolépticas similares a la cerveza siguiendo la tecnología cervecera. Los experimentos fueron realizados a escala banco en la etapa de maceración variando las composiciones de dichas materias primas incluyendo el agua. Los resultados fueron satisfactorios y comprobados por métodos estadísticos. Esto dio posibilidad a proyectar la etapa de maceración a una escala piloto con vistas a mayores producciones.

## **Abstract**

This work consisted to give a new use to the spent grain that is a residue from the brewing industry. For that they used the residue from the Alcohol Plant of the University of Matanzas; and by its characteristics they choosed a raw material that is the juice of sugarcane from that to obtain a new alcoholic beverage with the same characteristic of the beer following the brewing technology. The experiments were made on a smaller scale in the brewing process changing the percent of raw materials including the water. The results of that investigation have been acceptable and tested by statistics methods. It gave a possibility to project the brewing process to a pilote scale for getting more production.

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
1.1 Calidad de la cerveza como bebida alcohólica. ....	5
1.2 Breve resumen de las etapas en la elaboración de la cerveza. ....	7
1.3 Caracterización de las materias primas utilizadas en la fabricación de cerveza. ....	13
1.4 Tipos de adjuntos más utilizados. Características.....	15
1.5 Etapa de maceración.....	18
1.5.1 Métodos de maceración .....	20
1.5.2 Temperaturas y tiempos tradicionales de maceración.....	21
1.5.3 Modos de operación de la maceración .....	22
1.6 Residuales de la cebada, caracterización y usos. ....	23
CAPÍTULO 2. PARTE EXPERIMENTAL.....	25
2.1 Materiales y métodos. ....	25
2.2 Diseño experimental.....	27
2.3 Metodología de la investigación .....	27
2.3.1 Proceso de maceración para la experimentación .....	29
2.4 Especificaciones organolépticas. ....	32
2.5 Evaluación sensorial.....	33
2.5.1 Método Kendall.....	33



CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	35
3.1 Composición de las materias primas .....	35
3.2 Resultados experimentales del proceso de maceración.....	39
3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en la maceración.....	39
3.3 Características físico-químicas de las bebidas obtenidas: .....	40
3.4 Evaluación de la calidad de los productos.....	42
3.4.1 Evaluación sensorial.....	43
CAPITULO 4 PROYECCIÓN PRELIMINAR DE LA ETAPA DE MACERACIÓN PARA UNA PLANTA PILOTO. ....	46
4.1 Esquema de la proyección. ....	46
4.2 Molienda de la caña de azúcar .....	46
4.3 Tamizado del jugo de caña .....	47
4.4 Escalado del proceso .....	48
4.5 Valores aproximados de los costos de los nuevos equipos para la etapa de la maceración para la planta piloto. ....	53
4.5.1 Otros costos considerados .....	53
CONCLUSIONES .....	55
RECOMENDACIONES .....	56
BIBLIOGRAFÍA .....	57
ANEXOS	

## Introducción

En la elaboración de la cerveza industrial, la cebada es la materia prima principal tanto por sus propiedades como por ser la de mayor proporción que se encuentra con respecto a los otros componentes que conforman el sistema.

La cebada es un cereal que por sus características naturales distingue a la cerveza de otras bebidas alcohólicas pero su cultivo está limitado a regiones selectivas del planeta. Los países que no poseen este privilegio tienen que importar relativamente grandes cantidades para poder mantener activa esta industria. Los costos de la cebada han ido en ascenso en el mercado internacional justificado por las propiedades alimenticias que posee incluyéndose en la dieta humana y animal.

En general la tendencia filosófica mundial está primando el aprovechamiento al máximo de los recursos naturales e incluso humanos y se estudia e investiga todo residual de los distintos procesos industriales para obtener otros beneficios materiales, económicos y sociales.

La industria cervecera es una de las que menos residuales produce y estos no son de una gran amenaza al medio ambiente pero no se queda atrás en los propósitos de aprovechar al máximo todas las potencialidades de sus materiales residuales involucrados en el proceso y con esto mejorar tecnológicamente sus etapas productivas en diferentes sentidos.

En la etapa de maceración dentro el proceso cervecero se genera lo que se denomina bagazo de malta (afrecho) en cuya composición se encuentra presente proteínas, fibras y en menor grado almidones que no han sido degradados y su destino es preferentemente para alimento animal, aunque procesado, se utiliza en la industria farmacéutica. En Cuba la primera es la opción principal aunque se están realizando investigaciones para otros usos de este rico material residual. En la literatura revisada se deduce que poco se ha incursionado en la reutilización del bagazo de malta en la obtención de nuevas variantes de bebidas alcohólicas, tal vez porque el mismo se encuentra degradado y en un porcentaje agotadas sus propiedades por el propio proceso de maceración que le dio su existencia.

Los valores de los distintos componentes del bagazo de malta pueden variar en dependencia a muchos factores entre los que se incluye a la calidad de cebada, la eficiencia de la molienda en el malteado y a la propia operación de la maceración (Santos *et al.*, 2003)

Roberts (1976) demostró que un extracto de bagazo de malta es eficaz como agente antiespumante en la etapa de fermentación de este proceso en la que no se vio alterada la calidad de la cerveza cuando se aplicó esta variante. Investigación realizada por Huige (1994) con el bagazo de malta no tratado con vista a aumentar el rendimiento en la etapa de la fermentación no resultó satisfactoria ya que aquí si fue afectado los parámetros de exigencia del producto final.

En la literatura no se recoge información de la reutilización del afrecho (bagazo de malta) en alguna etapa de maceración como materia prima dirigida a obtener una bebida alcohólica con características similares a la cerveza, utilizando básicamente la misma tecnología del proceso cervecero y así colocar a este residual en potencia, para otra aplicación.

De la forma que este residual abandona la etapa de maceración es imposible suponer que pueda conducir a una bebida que en realidad el éxito de su terminación esté garantizada debido al agotamiento de sus componentes principalmente los almidones, esto conlleva a la necesidad de añadir suplementos que sustituyan esas propiedades que tiene en déficit y esto pudiera ser resuelto a través de algún componente de origen azucarado que también sea el encargado de imprimir a la bebida alcohólica resultante ciertas características distintivas.

Existe variedad de materiales que pueden ser sugeridos para esta situación sin dejar de valorar su potencialidad, disponibilidad y economía para ser nominados y decididamente establecidos.

Por otra parte la levadura que interviene en la segunda etapa del proceso cervecero que es la fermentación, no puede ejercer su función, ni multiplicarse si no está presente alguna materia que aporte un por ciento de nitrógeno amínico libre (NAL). Las cantidades que se deben utilizar están reguladas porque un defecto o exceso conllevan a problemas en la fermentación.

Precisamente el bagazo de malta contiene un por ciento aceptable de proteínas residuales que puede ser valorada para obtener el NAL requerido para el proceso de fermentación y así asegurar algunos requisitos de la calidad de la bebida final.

Entonces como **problema científico** se formula el siguiente:

*¿Será posible utilizar al bagazo de malta como una de las materias primas en la obtención de una bebida alcohólica con características organolépticas similares a la cerveza?*

La respuesta a este problema que constituye la hipótesis al mismo tiempo se establece como:

Con el enriquecimiento del bagazo de malta con azúcares y proteínas y sometido a un proceso cervecero será posible obtener una bebida alcohólica con características organolépticas similares a la cerveza.

El **objetivo principal** de este trabajo de investigación está encaminado a:

Establecer los parámetros fundamentales de operación a escala de banco en la etapa de maceración del proceso de obtención de una nueva bebida alcohólica.

En este trabajo se declara como **objetivos específicos** los siguientes:

Objetivos específicos:

- Caracterizar físico-químicamente al bagazo de malta.
- Seleccionar y caracterizar una materia prima apropiada para la etapa de maceración.
- Establecer a escala de banco la composición adecuada de materias primas para la obtención de la nueva bebida alcohólica.
- Utilizar al proceso tecnológico de elaboración de cerveza como base para la obtención de la nueva bebida.
- Realizar un escalado del macerador a nivel de planta piloto.
- Proponer la modificación a los procesos previos a la etapa de maceración para el nuevo producto.

La estructura organizativa de este trabajo es el siguiente:

Capítulo 1 Revisión bibliográfica, se realiza un análisis de la información existente relacionada con el tema del trabajo.

Capítulo 2 Parte experimental, se muestra los procedimientos, etapas, pasos a seguir para la obtención de la bebida alcohólica con las características organolépticas de la cerveza.

Capítulo 3 Análisis de resultados y discusión.

Capítulo 4 Proposición del escalado de la etapa de maceración.

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía. Se exponen las referencias bibliográficas utilizadas en la investigación.

Anexos. Refiere las tablas, cuadros, figuras que complementan los resultados teóricos, metodológicos y prácticos de la investigación.



## Capítulo 1 Revisión bibliográfica

En el siguiente capítulo se realiza un análisis de la información existente relacionada con el tema del trabajo. El análisis bibliográfico está dirigido hacia la revisión del estado actual del uso que le dan al bagazo de cebada malteada o afrecho de cebada. Se hizo énfasis en las características de este residuo industrial cuyo contenido de carbohidratos y proteínas hace posible su conversión en etanol.

### 1.1 Calidad de la cerveza como bebida alcohólica.

Tradicionalmente la calidad se ha definido como el grado con que un producto concreto satisface los deseos de un consumidor. Esta definición expone bien a las claras que esa satisfacción se consigue no solo con el producto en sí, depende también de todo lo que acompaña al producto, precio, presentación, servicio, atenciones, etc. (Dragone *et al.*, 2002).

Según Bradee *et al.* (2002), existe otra definición de calidad, más restringida, es el nivel de conformidad de un producto a su diseño o sus especificaciones. Esta calidad está en concordancia y es la que se puede generar y controlar dentro del proceso.

Según Verhoef (2003), la calidad está estrechamente relacionada con una serie de parámetros que son:

- El color: es determinado las materias primas, especialmente la malta puesto que el color del mosto determina el color de la cerveza. Hay maltas claras y maltas oscuras. Pero también tienen influencia en el color el trabajo realizado en la sala de cocinas o parte caliente del proceso, la composición del agua utilizada y las otras materias primas. La cepa de levadura también influye en el color final de la cerveza.
- La espuma: toda cerveza debe tener una espuma estable. La formación de la espuma es relacionada con la presencia del lúpulo y depende del contenido de gas carbónico y de derivados de las proteínas que al final mantiene en suspensión la cerveza.
- Brillo y transparencia: la cerveza debe ser clara y brillante. La turbidez en una cerveza puede deberse a deficiencias en la filtración, contaminación microbiológica por bacterias o levaduras salvajes, presencia de proteínas pesadas que no fueron retiradas durante el proceso, desgasificación o contaminación con oxígeno por fisuras en el tapado y reacciones fotoquímicas por exposición a la luz solar.



- Contenido alcohólico y densidad o extracto: el grado alcohólico, no debe ser alto sino moderado, el grado adecuado para una buena cerveza es de 4-5%. Depende de la gravedad original del mosto que es la cantidad de azúcares que se tiene al inicio de la fermentación.
- El amargor, la acidez (pH) y el efecto del anhídrido carbónico se consideran también como parámetros para medir la calidad de una cerveza.

Por ello, para cada una de las cervezas que se elabora, están establecidas normas que mejor definen cada tipo de cerveza y se señala los valores, con sus tolerancias, que cada uno debe alcanzar (Dragone, 2002).

La Norma Técnica de Cerveceros Latinoamericanos indica que el pH de la cerveza debe estar entre los valores de 4.0 a 6.0. La acidez total promedio expresada como ácido láctico de la cerveza debe estar dentro del rango de 0.1-0.4 %. En el caso de que los valores de pH no estuvieran en el rango permitido se debe ajustar mediante adición de solución básica o ácido fosfórico lo cual favorece obtener una mejor fermentación. Según Kunze (1999), el mosto no debe ser muy ácido debido a que la levadura que se inocule no encontrará las condiciones adecuadas para llevar a cabo una fermentación eficiente y maximizar la producción de alcohol y, por otro lado, el producto final resultaría con un sabor marcadamente muy ácido.

El grado alcohólico de la cerveza debe estar en el rango de 2.5 a 9 %. La concentración de CO<sub>2</sub> de la cerveza debe estar en el rango de 2.4 - 3.6 (%p/v). También debe tener como mínimo dos unidades de amargor (2 U.A) que es equivalente en el sistema internacional a dos Bittering Units (2 B.U) (ALAFACE, 1999).

Cuando se expresa la calidad en la producción, implica el uso en forma óptima del rendimiento de los parámetros relacionados con esta.



## 1.2 Breve resumen de las etapas en la elaboración de la cerveza

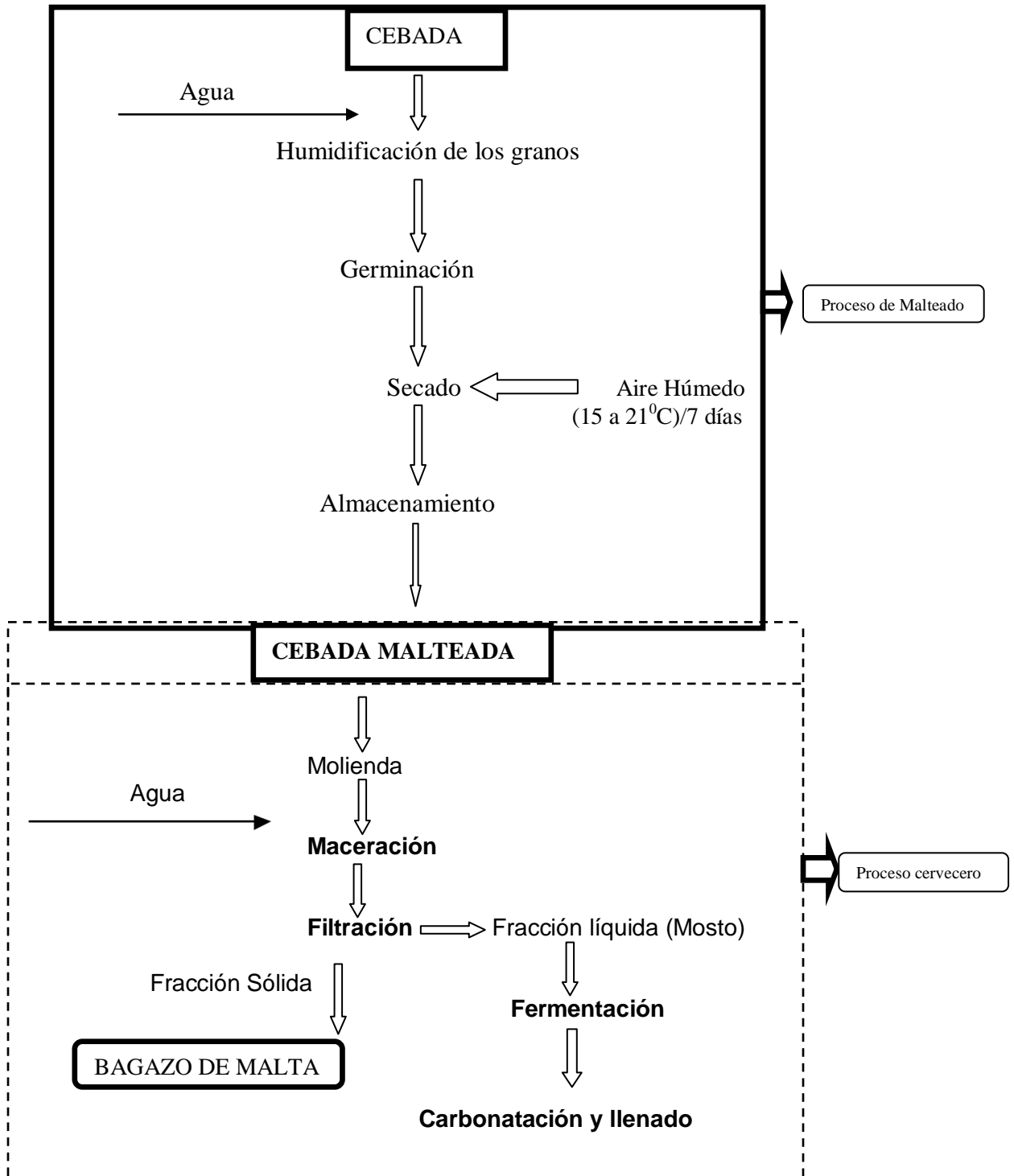


Fig.1.1 Representación esquemática del proceso de obtención de la cerveza.





El proceso de elaboración de cerveza está constituido por cinco etapas fundamentales: malteado, maceración, filtración, fermentación y carbonatación, en las que ocurren todas las diferentes transformaciones necesarias para la elaboración de esta.

La primera fase de la elaboración de la cerveza es la elaboración de la malta. Esta fase es previa a cualquier otra en la elaboración de la cerveza y es considerada de vital importancia en su producción. La cebada no se puede utilizar directamente para la producción de cerveza, los estudios realizados de esta planta demuestran que los azúcares contenidos en el grano de cebada no son inmediatamente accesibles y, en una fase previa, es preciso activar las enzimas presentes en el propio grano que participarán en la reducción de las largas cadenas de almidones (Gupta *et al*, 2010).

- **Malteado**

La cebada no se puede utilizar directamente para la producción de cerveza, ya que no tiene desarrollado el sistema enzimático encargado de transformar el almidón en azúcares fermentables. Para eso es necesario proporcionarle a la cebada las condiciones adecuadas de humedad, temperatura y oxigenación con el fin de aumentar su actividad enzimática (Figueroa, 1985).

Según Molina (1989), esta operación consiste de manera general en tres fases: remojo, germinación y secado; en las que se controla cuidadosamente la humedad, la temperatura y la aireación o secado.

En el remojo, la cebada limpia se coloca en agua hasta que absorba un contenido de humedad propio. Posteriormente, durante la germinación, la cebada remojada desarrolla gran cantidad de enzimas bajo condiciones controladas, y por último, en la operación del secado, la cebada germinada o malta verde se seca con aire caliente para inhibir la actividad enzimática y detener la germinación del grano.

La operación de remojo se divide en dos etapas, que son: remojo piloto y remojo general.

*Remojo piloto*: la absorción de agua es un proceso físico independiente de la viabilidad del grano; por tanto, se efectúa de igual manera en los granos viables que en los rotos y muertos.

El remojo piloto es una prueba previa al remojo general, mediante la cual se determina a temperatura constante la velocidad de absorción de agua que tiene el genotipo en estudio El



objetivo del remojo piloto es determinar el tiempo de absorción de agua de los genotipos para lograr un 45 por ciento de humedad en los granos a temperatura constante (160 °C).

La temperatura es otro de los principales factores que influyen en la absorción del agua por el grano. Así se tiene que cuando la temperatura se eleva, más rápidamente se efectúa la absorción hasta llegar a los límites físicos de saturación. A temperatura constante la isoterma de absorción sigue una curva potencial para los granos pesados, y logarítmica para los más livianos, y alcanza un valor constante asintótico cerca del punto de saturación.

A bajas temperatura, el grado de tostado es mínimo y se habla de *maltas claras* (llamadas también *maltas Lager* o *Pale* según el país en que se producen). En el proceso de secado, a medida que se aumenta la temperatura, la malta resultante es cada vez más oscura. Se puede llegar al punto de quemarla, produciendo *malta negra*. El grado de tostado de la malta determina el color de la cerveza.

Según Kunze (1999), la malta debe de estar compuesta por estos componentes que se encuentran a continuación para cumplir con los parámetros de calidad:

- Carbohidratos: 70 - 85 %. Está formado por gránulos grandes y pequeños, no tiene gránulos de mediano tamaño. Estos gránulos consisten en la amilopeptinas y la amilasa
- Componentes nitrogenados (proteínas): 10.5 - 11.5 %
- Grasas: 2 - 4 %
- Material inorgánico: 1.5 - 2 %

El almidón tiene entre el 50 y el 63% en la composición de los carbohidratos, por lo que es considerado el componente más importante de los mismos y además es quien asimila y condensa la glucosa.

- **Maceración**

Como se observa en la Figura No 1.1, el proceso cervecero comienza cuando la cebada esté molida. Esta operación se hace con un equipo que se llama molino. El término molino se utiliza para describir una gran variedad de máquinas de reducción de tamaño para servicio intermedio. Consiste en un sistema de dos cilindros empleado para el desprendimiento de la película del grano de malta, triturándose el cuerpo principal del almidón al grado necesario para poderlo someter a proceso. En este caso la cebada malteada es comprimida entre los dos cilindros, un sistema simple propio de cervecerías pequeñas, pero evitando destruir la cáscara lo menos posible



pues ésta servirá de lecho filtrante en la operación de filtración del mosto; a su vez el interior del grano en una harina lo más fina posible.

Una vez obtenida el grano malteado, éste se tritura y se mezcla con agua caliente para extraer sus azúcares naturales mediante procesos enzimáticos bioquímicos. La transformación del almidón en azúcares es vital, ya que las levaduras encargadas de la fermentación lo necesitan para su crecimiento y multiplicación.

El proceso de maceración constituye la etapa fundamental, decisiva en el proceso de producción de la cerveza, que consiste en mezclar los cereales malteados con agua caliente para obtener una masa de azúcares fermentables y una serie de dextrinas las cuales dan características a la bebida (Kunze, 1999).

En esta etapa del proceso se realiza la conversión del almidón en maltosa, proceso conocido como sacarificación y tiene una duración alrededor de 2 horas, en dependencia de la cantidad de almidón y de enzimas presentes en el grano.

La maceración se realiza en un equipo llamado caldera de maceración o de cocimiento (olla de cocción), un tanque cilíndrico dotado de una doble pared, donde se le inyecta vapor para elevar la temperatura de la mezcla y producir la maceración el mosto.

En este equipo que será sometido a un proceso de vigorosa ebullición para esterilizarlo y eliminarle algunas proteínas que serán coaguladas y sedimentadas para evitar que se conviertan en un problema posterior cuando la cerveza se encuentre ya embotellada. Es en la olla de cocción donde se le adiciona a la cerveza uno de sus ingredientes más característicos como es el lúpulo para comunicarle su típico sabor amargo. El mosto debe hervirse durante un mínimo de 90 minutos, durante este paso se alcanza la densidad que se pretende obtener en la cerveza, es decir, la proporción de azúcares fermentables en el mosto por cada 100 gramos. Otro objetivo del proceso del hervido es desnaturalizar las enzimas y eliminar bacterias presentes, quedando así esterilizada la infusión.

Los factores que influyen en la degradación de almidón son: temperatura, tiempo de maceración, pH y la agitación de la mezcla; siendo la temperatura el factor más importante. Al aumentar la temperatura va aumentando la actividad enzimática hasta alcanzar su valor óptimo (Briggs *et al.*, 2004).



- **Filtración**

Una vez disueltas las materias solubles por el cocimiento, es necesario separar el mosto de la parte insoluble llamada bagazo o afrecho. La operación se realiza por el filtraje de la masa que es la separación del líquido resultante de la maceración, llamado mosto y que contiene los azúcares extraídos a la cebada malteada, y de los restos de la malta como las cáscaras y fibras.

Existen dos tipos de aparatos donde se realizan la filtración del mosto: cuba filtro y filtro prensa.

*Cuba-filtro:* la variación de concentración del afrecho no implica directamente en el volumen de la cuba, pudiendo ser el espesor de 25 a 50 cm. Como desventaja la proporción de adjunto es de 25 %. Otra ventaja es la menor mano de obra, pero el tiempo de filtración es mayor. (Briggs *et al.*, 2004).

*Filtro-prensa:* se puede filtrar un mosto más denso, con una filtración más rápida y una proporción de adjuntos mayor del 75 %. Como desventajas, el mosto es menos brillante, hay mayor cantidad de ácidos grasos insaturados, y el trabajo es más exigente (Briggs *et al.*, 2004).

Al final de este equipo el mosto estará listo para pasar a la etapa fermentativa del proceso que se inicia con una rápida disminución de la temperatura desde 100°C hasta 6°C. Es decir, de aquí se irá directamente a la parte fría del proceso de producción.

- **Fermentación**

Según Lekkas *et al* (2007), la fermentación es el proceso en el cual se transforman los azúcares fermentables bajo la acción de levaduras para obtener etanol y dióxido de carbono.

La fermentación juega un rol esencial en la calidad de la bebida, en particular el control de los productos secundarios como los alcoholes superiores y ésteres se hace en esta etapa del proceso (Filho, 2005).

El mosto, después de ser filtrado tiene que enfriarse en un período de tiempo hasta alcanzar la temperatura de adecuada para facilitar la acción de la levaduras.

Este proceso se divide en dos fases principales, una primera fase donde la levadura consume únicamente el oxígeno contenido en el mosto para multiplicarse (respiración), y una segunda fase donde, a falta de oxígeno, empieza a consumir los azúcares (verdadera fermentación).



La fermentación se puede realizar a diferentes temperaturas según la cepa de levadura y el estilo de cerveza a elaborar. Por lo cual se distingue:

Fermentación de superficie: se utiliza levadura que va a la superficie del líquido después de finalizar la fermentación. Con este sistema se hacen cervezas tipo Ale, Porter, Lambic.

Fermentación de fondo: se emplea un tipo de levadura que se sedimenta al fondo de la tina después de haber efectuado la fermentación del mosto. Con ella se hacen cervezas tipo Lager, en las cervecerías nacionales se emplea este tipo de fermentación (Carrillo, 2003)

La duración de la fermentación depende de las temperaturas, de la concentración de azúcares, de la cantidad de oxígeno disuelto y del tipo de levadura utilizado entre otras.

El proceso de fermentación ocurre según la reacción general:



Esta es la ecuación de Gay-Lussac, y sólo representa los productos iniciales y finales.

Generalmente se utiliza tanques llamado tanque de fermentación como equipo en la etapa de fermentación.

- **Carbonatación y llenado**

Una vez fermentado el mosto, este pasa a ser llamado: cerveza verde. Esta cerveza contiene todavía otros subproductos que provienen de la fermentación y que es aspirado eliminarlos durante la maduración. Cuando se acaba la fermentación se lleva la cerveza a los tanques de reposo (lagering), donde la cerveza va madurando a una temperatura aproximadamente a 0° C.

Existe la posibilidad de pasar entre la fermentación y el lagering por otro filtro, aunque eso cada día se hace menos, porque en las cervecerías modernas se fermenta y reposa en el mismo tanque, en cuyo fondo se van depositando los restos de la levadura.

En las cervezas de baja fermentación el proceso de lagering es muy importante, porque este tiempo les proporciona un carácter más profundo. Por esta razón a las cervezas de baja fermentación se les suele llamar también "lager".

El tiempo de almacenaje varía mucho, las cervezas con poco alcohol suelen almacenarse menos tiempo y las cervezas con un grado alcohólico superior y suelen almacenarse períodos más largos de hasta un año.

Para eliminar la levadura que queda en suspensión y las proteínas que se han coagulado y quedado también en suspensión como resultado de reducir la temperatura durante la maduración,



la cerveza pasa de nuevo por una filtración que elimina los últimos restos que puedan quedar de la fermentación y también los restos de nitrógeno que durante el lagering han formado una especie de mucosa, lo que podría provocar más adelante que la cerveza saliera turbia, un efecto que no debe de ocurrir en las cervezas.

Antes de llevar la cerveza a la máquina de llenado se inyecta CO<sub>2</sub> en los tanques hasta conseguir la saturación deseada, para que la cerveza salga de su recipiente con una buena capa de espuma.

Para alargar el tiempo de conservación de una cerveza, sin que cambie de aspecto, se esteriliza la cerveza por medio de la pasteurización después del envasado (las botellas pasan por un túnel con agua a 70° C), o con una flash-pasteurización antes de envasar (durante el recorrido del tanque a la cadena de envasado la cerveza se calienta hasta 65° C). La pasteurización se hace para aumentar la estabilidad biológica de la cerveza, para no producir reacciones no deseadas.

### **1.3 Caracterización de las materias primas utilizadas en la fabricación de cerveza.**

La elaboración de cerveza ha ido en desarrollo manteniendo la relación entre la calidad y la economía. Hoy en día la materia prima principal de la cerveza sigue siendo la cebada y esta es muy costosa y se encarece cada día más. Se han investigado sobre muchas variantes de adjuntar a la cebada cereales tales como: arroz, maíz, trigo etc. de forma tal que se mantengan las características que distinguen a la cerveza (Hughes, 2003).

A continuación se recogen algunos aspectos sobre las principales materiales que no pueden faltar en el proceso de fabricación de esta bebida.

La cebada (*Hordeum vulgare*) es un cereal altamente adaptables que se produce en climas que van desde la sub-ártico a subtropical. Ocupa el quinto lugar entre todos los cultivos en la producción de materia seca en el mundo (129 millones de toneladas métricas, desde 2002 hasta 2005 como media) (Gupta *et al.*, 2010). Históricamente, la cebada ha sido una importante fuente de alimento en muchas partes del mundo, incluyendo el Medio Oriente, África del Norte y el norte y el este de Europa y en Asia (Newman *et al.*, 2006). En la actualidad, sólo el 2% de la cebada se utiliza para la alimentación humana porque posee vitaminas del grupo B, ácido fólico, colina y vitamina K. En materia de minerales, es buena fuente de potasio, magnesio y fósforo, pero su mayor virtud es la riqueza en oligoelementos: hierro, azufre, cobre, cinc, manganeso,



romo, selenio, yodo y molibdeno. Además la cebada posee otras sustancias benéficas, antioxidantes y protectoras del cáncer (Baik *et al*, 2008).

En la elaboración de la cerveza se utilizan numerosos cereales en su estado crudo o malteado, siendo la cebada el único que debe de maltearse necesariamente porque con los demás cereales, el malteado sirve para conseguir aromas diferenciados o efectos técnicos concretos.

El lúpulo es un ingrediente que proviene de las flores maduras femeninas de la planta del mismo nombre. Entre todas las plantas herbáceas que se han utilizado a lo largo de la historia para dar sabor o conservación de cerveza, el ha sido el más indicado (*humulus lupulus l.*) y está considerado, en la actualidad y a nivel mundial, como una materia prima esencial para este proceso porque le imprime a la cerveza el gusto amargo, agradable y el fino aroma que la caracteriza, interviniendo también en la formación y calidad de la espuma. Existen numerosas variedades botánicas del lúpulo que son objeto de muchas investigaciones y que se clasifican en:

- *Lúpulos amargos*: son los que aportan más ácidos amargos que aromas.
- *Lúpulos aromáticos*: son los que aportan más elementos aromáticos que amargos
- *Lúpulos mixtos*: aportan ambas características juntas aunque menos acentuadas. La variedad y el frescor del lúpulo influyen muy sensiblemente en la calidad final. A lo largo de los últimos cuarenta años, se ha producido una rápida proliferación de diversos tipos de productos derivados del lúpulo o de formas de procesar el mismo, ofreciendo diversas ventajas, tanto económicas como relacionadas con la calidad final de la bebida donde es utilizado. El uso del lúpulo como tal contribuye a que ahora se pueda controlar de forma más efectiva de los parámetros fundamentales en la calidad del producto final que son: el aroma, el amargor, la espuma y la estabilidad frente a luz de la cerveza.

Otros componentes importantes son las levaduras son 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 (Lekkas *et al*, 2007). Existen dos tipos básicos diferentes de levadura que definen los dos grandes grupos estilísticos de cervezas:

- La levadura de alta fermentación es la que se encuentra normalmente en la naturaleza. Taxonómicamente recibe el nombre de *saccharomyces cerevisiae*. Se encuentra en los tallos de



los cereales y en la boca de los mamíferos. Fue descubierta por Louis Pasteur en 1852 en sus investigaciones sobre la fermentación de la cerveza. Esta variedad actúa a temperaturas de entre 12 y 24 °C y se sitúa en la superficie del mosto azucarado. A las cervezas que se consiguen con este tipo de fermentación se les llama de alta fermentación o ales.

- La levadura de baja fermentación es una variedad descubierta involuntariamente por los fabricantes del sur de Alemania que sometían sus cervezas a una maduración a bajas temperaturas en las cuevas de los Alpes. Estos hongos, de la especie *Saccharomyces Uvarum* (también denominada *Saccharomyces Carlsbergensis*), actúan a temperaturas de entre 7 y 13 °C y se suele situar en el fondo del fermentador. Las cervezas que se elaboran con esta variedad son las llamadas de baja fermentación o lager. (Donaldo, 2007).

Otro elemento indispensable, que interviene no sólo en las etapas iniciales, sino también en otras etapas del proceso y también en la limpieza de los equipos de la planta de elaboración de la cerveza es el agua (H<sub>2</sub>O). Más del 85 a 90% de la cerveza es agua y en la fabricación de cerveza se suele utilizar alrededor de 4 litros de agua para producir un litro de cerveza. Cada una de estas etapas utiliza la calidad un poco diferente del agua.

El agua es un elemento básico en la elaboración de la cerveza, influye en gran medida en el sabor de la misma, dando lugar a una cerveza más suave, o más dulce, debido a sus diferentes durezas y sabores, además contiene minerales y sales en diferentes proporciones. La composición del agua influye en el proceso de fabricación. En la fabricación de cerveza se utiliza agua potable y sus características organolépticas deben ser completamente normales.

#### **1.4 Tipos de adjuntos más utilizados. Características.**

Con el objetivo de mejorar la consistencia del mosto de modo tal que mejore la vida útil de la cantidad de nitrógeno, la reducción de color (o aumento de color con los cereales malteados y los caramelos) y la disminución del costo de producción, se le adiciona lo que se denomina adjunto.

Este término es de uso frecuente para referirse al trigo, arroz y el maíz, los más utilizados en la elaboración de la cerveza para complementar la fuente de almidón (Michael, 1999).

Los diferentes tipos de adjuntos pueden ser clasificados en sólidos y los jarabes del líquido. El Food Standard Committee Report on Beer (FSCRB), en el año 1977, definió como adjunto: cualquier fuente de sacáridos además de la cebada malteada el cual ofrezca azúcares al macerado.





Los adjuntos pueden ser de origen cereal, (trigo, arroz, maíz, etc.), o sustancias de origen azucarado que son disueltas directamente en el tacho.

Los adjuntos sólidos pueden ser los diversos cereales que se utilizan para complementar a la cebada y presentan cada uno variedades botánicas que multiplican las posibilidades de elección del fabricante. Actualmente pueden encontrarse en el mercado hasta sesenta tipos diferentes, cifra que aumenta considerablemente si se tiene en cuenta el malteo casero (Verhoef, 2003).

En el caso del malteado los cereales se clasifican en cuatro categorías:

- Malta básica: maltas claras con gran poder enzimático, que suelen formar la parte más grande o la totalidad de la mezcla. Usualmente estas maltas son llamadas lager, pale o pils, según el fabricante.
- Maltas aditivas: son maltas de color que va de ámbar a negro, con poco poder enzimático. Suelen ser usados en pequeñas cantidades para incidir sobre el color o el gusto de la cerveza o por algún motivo técnico propio de la elaboración. Hay entonces una gran variedad, entre los cuales se puede citar las maltas negras, maltas chocolate o maltas tostadas.
- Maltas mixtas: estas maltas están más tostadas que las maltas base pero conservan propiedades enzimáticas suficientes al menos para sus propios azúcares. De manera que pueden ser usados como base o como aditivos. En esta categoría se encuentran las maltas de color caramelo y ámbar conocidos en Inglaterra como maltas cristal (y derivados) y en Alemania como maltas caramelo.
- Cereales crudos o tostados. Como ya se ha dicho, los cereales pueden ser utilizados sin maltear para añadir variedad en gustos, aromas, textura y otras características a la cerveza. Se suelen utilizar en pequeñas cantidades.

La calidad de los cereales, sus variedades y la calidad del proceso de malteo definen en gran medida la calidad de la cerveza. (Donaldo, 2003).

Generalmente el porcentaje de adjuntos con respecto a la materia prima principal no debe exceder del 30 al 40% de total de granos (Michael, 1999).

El cereal debe de ser preparado para que sus azúcares sean fermentables. Se utilizan numerosos cereales en su estado crudo o malteado, siendo la cebada el único que debe de maltearse



necesariamente y el más utilizado en la cervecería occidental (Mussatto, 2007). En algunos casos una simple cocción es suficiente (como en el caso del maíz) y en otros casos es preciso «maltear» el cereal.

El uso de adjuntos sólidos presenta como ventajas un aumento en la densidad y la estabilidad de la bebida también ajusta el color y el sabor de esta última. Como desventaja, gasto de energía en su preparación antes de incorporarlo en el proceso.

Mientras tanto, los jarabes líquidos por otra parte son utilizados para ser agregados directamente a la caldera.

En el caso de los adjuntos de origen azucarado se puede enumerar: dulcificantes por ejemplo jarabe del arce, miel, y melaza son los más comunes. Según Clarke *et al.* (1986b), el jugo de caña por tener las mismas características que estas últimas puede ser considerado como adjunto aportando azúcares fermentables necesarios al proceso.

Cuando se utiliza adjuntos del origen azucarado en el proceso de producción de cerveza se crea un desbalance en la relación NAL / azúcares fermentables, provocando serios trastornos en el metabolismo de las levaduras. Como el bagazo de malta en su composición queda un remanente proteico relativamente importante, es posible mediante el uso de enzimas exógenas hidrolizar estas proteínas hasta aminoácidos y péptidos pequeños y por tanto mejorar esta relación (Carrillo, 2003).

En el caso de la miel, esta última provee solamente una porción de las azúcares convertidas durante la fermentación y se utiliza sobre todo para el sabor, el azúcar del caramelo es un ingrediente común en las cervezas inglesas belgas fuertes, donde aumenta el contenido de alcohol en el producto final mientras que deja el mosto un poco claro; las variedades oscuras de azúcar del caramelo también afectan el color y el sabor de la cerveza (Donaldo, 2007).

El jugo de caña de azúcar contienen pequeñas cantidades de almidón, aproximadamente 50 y 70 mg/l, en forma de gránulos, los cuales durante la molienda se separan del tejido vegetal y se solubilizan en forma de dos estructura: la amilosa y la amilopectina.

Con la utilización de adjuntos azucarados se disminuye en el mosto el contenido de nitrógeno y sustancias nutritivas y se incrementa el porcentaje de alcoholes superiores al producto final durante la fermentación. Estos presentan como desventaja: con un mayor por ciento de estos adjuntos favorece la presencia de gusto y olor desagradables en la cerveza, esto suele ocurrir debido a un enfriamiento rápido del mosto. Esto se produce por contaminación bacteriana:



acéticas y/o lácticas. Además del olor y sabor se puede observar, en el fermentador turbidez y filamentos mucosos blanquecinos (Kunze, 1999).

**Tabla I. Composición del grano de cebada, maíz, trigo y arroz por 100 gramos de sustancia.**

Componentes	Porcentajes (%)			
	Cebada	Maíz	Arroz	Trigo
Agua	13,00	16,00	12,50	13,00
Carbohidratos	76,70	75,60	74,90	76,30
Grasas	1,10	1,65	0,80	2,30
Proteínas	7,65	8,00	7,50	10,50
Calcio	0,04	0,48	0,01	0,04
Fósforo	0,39	0,12	0,15	0,38
Hierro	0,05	0,05	0,01	0,04

Fuente: <http://www.fao.org/docrep>, consultado 05 de febrero del 2011.

### 1.5 Etapa de maceración

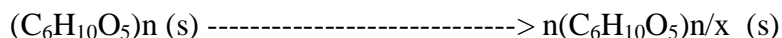
En la elaboración de la cerveza existe una etapa decisiva tecnología cervecera existe una etapa fundamental en que se promueve la hidrólisis enzimática o conversión enzimática que es la maceración (Dragone *et al.*, 2002). Esta etapa empieza cuando el cereal molido que se utiliza como materia prima se mezcla con agua a una temperatura inicial de 45 °C. Es necesario señalar que el inicio del proceso de maceración es la molienda de los granos malteados y otras operaciones destinadas a activar diversas enzimas (secado) que reducen las largas cadenas de almidones en otras más simples y fermentables.



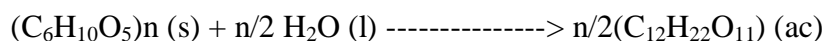
La maceración es la parte del proceso en la cual se extraen de la malta y eventualmente de los granos crudos la mayor cantidad de extracto y de la mejor calidad posible en función al tipo de cerveza que se busca fabricar. La finalidad de la maceración es la conversión de los almidones de los cereales en sustancias más simples y susceptibles de ser solubles y fermentarse tales como el azúcar de malta y otros compuestos de baja masa molar (Gupta *et al.*, 2010).

Las amilasas desdoblan el almidón en dextrinas y maltosa principalmente, las enzimas proteolíticas desdoblan las proteínas complejas en materias nitrogenadas solubles, la fitasa desdobla la fitina en inositol y fosfato, etc. Estas transformaciones enzimáticas han sido ya empezadas durante el malteado a una regularidad mucho menos intensa de la que sucederá en el cocimiento; donde debido a la acción de las diferentes temperaturas y la gran cantidad de agua las reacciones suceden muchas veces en forma explosiva (Lewis, 2006).

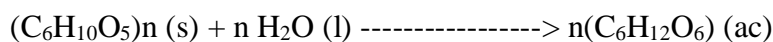
Cuantitativamente el desdoblamiento del almidón en azúcares y dextrinas es el más importante. Para la fórmula general del almidón:  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , las principales reacciones que ocurren durante el cocimiento por acción de las amilasas son formación de dextrinas.



Formación de maltosa:



Y en menor proporción formación de glucosa



El almidón contiene dos polisacáridos diferentes: amilosa y amilopéctina; la amilosa está constituida por cadenas rectilíneas de glucosa con uniones  $\alpha$  1-4; la amilopéctina está constituida por cadenas ramificadas de uniones de glucosa en uniones  $\alpha$  1-4 y  $\alpha$  1-6 existiendo también uniones del tipo  $\alpha$  1-3. Para desdoblar el almidón se necesitan varias amilasas siendo las principales las  $\alpha$  y  $\beta$  amilasas.

Según Carrillo (2003), cada kilogramo de malta molido tiene 760 gramos de extracto (E), que no es más que la cantidad de sólidos solubles que deben ser extraídos por kilogramo de malta, una vez terminada la maceración.

En la maceración se controla dos variables, tiempo y temperatura, manteniendo la agitación constante y un pH de trabajo para que las enzimas realicen su función. Si al mosto no se le ajusta



el pH, la levadura que se inocule no encontrará las condiciones más adecuadas para llevar a cabo una fermentación eficiente y maximizar la producción de alcohol. (Gonzales, 2006).

### 1.5.1 Métodos de maceración

Según Álvarez (2001), existen dos métodos fundamentales en el proceso de maceración: infusión y cocción. En la práctica se emplean muchas modificaciones de estos métodos.

Maceración por infusión: hay dos procedimientos de infusión, uno es el de temperatura ascendente y el otro es el descendente.

Primero la cebada malteada se mezcla (amasa) con agua a una temperatura de 38 a 50°C. Se deja reposar la mezcla durante una hora a esa temperatura para favorecer la acción de las enzimas proteolíticas. Se aumenta la temperatura de 65 a 70°C. Se deja reposar el mosto durante 15 minutos para la sacarificación del almidón. Después se calienta hasta aproximadamente unos 75°C para destruir las enzimas, y a esta temperatura se filtra el extracto.

En el proceso de temperatura descendente, el agua empleada para el extracto está a 77°C. La adición de la cebada malteada ayuda a enfriar el agua hasta una temperatura de 70°C. Para la sacarificación se mantiene a esta temperatura 70°C hasta bajar a 65°C, como en el proceso anterior. La temperatura final es inferior a la inicial (Briggs *et al.*, 2004). Este proceso de infusión descendente es un método inglés.

Maceración por cocción: en este método la mezcla de la cebada malteada y el agua se hace a temperatura menor (alrededor de 40°C) que los dos procesos de infusión. Se va elevando gradualmente la temperatura de la mezcla hasta obtener una temperatura final de 75 °C. Se separa aproximadamente un tercio de la mezcla, que se calienta y se hierve durante un corto período de tiempo, y se vuelve a unir al mosto inicial, elevándose la temperatura de la mezcla total. Las enzimas de la porción hervida se destruyen, pero las paredes celulares del grano se ablandan, licuándose el almidón. De este modo se facilita la acción diastásica. Se mantiene toda la masa a la misma temperatura durante media hora, sacando entonces otra porción que se hierve y se vuelve a añadir al total. Este proceso puede repetirse otra vez más. Según Briggs *et al.* (2004), después de que el proceso se ha repetido tres veces debe mantenerse el mosto a la temperatura inicial de 40°C, con el fin de extraer las enzimas y favorecer la proteólisis. Después de estas operaciones la temperatura será mantenida a 50 °C para una proteólisis completa; a una



temperatura de 60 a 65 °C para la sacarificación, y de 70 a 75°C para la dextrinización por la  $\alpha$ -amilasa de la parte del almidón que queda sin transformar.

Comparación de los métodos: El proceso de cocción suele dar un porcentaje mayor de extracto que el de infusión presentando como única desventaja la complejidad en la operación por esto se suele usar el método de infusión que es más simple.

Según Gonzales (2006), es mejor el gusto del mosto obtenido en maceración por cocción porque se disuelven menos las resinas amargas. Sin embargo, ambos métodos dan buenos resultados.

También Gonzales (2006), incursionó sobre otro método de maceración pero que en realidad es sobre la base de una combinación de los dos métodos ya existentes.

### 1.5.2 Temperaturas y tiempos tradicionales de maceración

Cada cervecería utiliza el sistema de maceración que lo caracteriza según las materias primas y los equipos de que se disponen, y según el tipo de cerveza que se desea elaborar.

La temperatura de formación del mosto es un factor muy importante para la determinación del tipo de cerveza a producir. A temperaturas elevadas se favorece la acción de la  $\alpha$ -amilasa, y de este modo se produce una mayor proporción de dextrina. La fermentación de este extracto dará una cerveza de menor riqueza alcohólica. Por otra parte, el empleo de temperaturas bajas de conversión da lugar a la producción de una mayor proporción de azúcar, lo que se traducirá en una cerveza más alcohólica (Bradee *et al.*, 2002).

Para lograr esto, se busca favorecer las reacciones enzimáticas dejando las masas a determinadas temperaturas durante algún tiempo. Este tiempo y a esa temperatura se le llama reposo y los más comunes en los diferentes sistemas de maceración son:

Reposo de hidratación (35 °C): es un reposo que varía entre 20 a 60 minutos, y se realiza cuando se descarga las harinas de malta en el agua cervecera con el agitador de la paila funcionando (Briggs *et al.*, 2004).

Reposo de proteólisis (45 °C): esta temperatura es óptima para la actividad de la péptidasa, es decir para la formación de aminoácidos y péptidos simples, también hay actividad de la fitasa (48 °C) que activa la transformación de los compuestos orgánicos del fósforo. Este reposo se conoce también como de peptonización y puede variar de 10 a 60 minutos (Briggs *et al.*, 2004).



Reposo de formación de azúcares (55 - 65 °C): temperatura óptima para la formación de maltosa o sea para la actividad de la  $\alpha$ -amilasa variando entre 5 a 20 minutos, aquí aún hay algo de actividad proteolítica y algo de actividad de la  $\alpha$ -amilasa (Briggs *et al.*, 2004).

Reposo formación de dextrinas (67 - 70 °C): a esta temperatura se tiene la máxima actividad de la  $\alpha$ -amilasa produciéndose una gran cantidad de dextrinas, con un tiempo que varía entre los 5 y 30 minutos (Briggs *et al.*, 2004).

Reposo de conversión (70 - 74 °C): este reposo la mayoría de veces es idéntico al anterior, pero sirve para completar todas las actividades enzimáticas, en este reposo quedan sacáridos de acrodextrinas hacia abajo. Con una duración máxima de 30 minutos (Briggs *et al.*, 2004).

Reposo estabilización de masa (74 - 77 °C): se realiza para inactivación total de las enzimas, hay una ligera actividad de la  $\alpha$ -amilasa, pero se va destruyendo. Con este reposo se termina la maceración, posteriormente se pasará la masa a la paila de filtración o filtro prensa para separar los afrechos. Este reposo con un promedio de duración entre 5 a 10 minutos es importante para regular la viscosidad del mosto durante la filtración (Briggs *et al.*, 2004).

### 1.5.3 Modos de operación de la maceración

Según Gupta *et al* (2010), existen dos tipos de maceración:

*Maceración en frío*: consiste en sumergir en un lapso de tiempo el producto a macerar en un recipiente con la menor cantidad de agua posible, sólo lo suficiente como para cubrir totalmente lo que se desea macerar.

La ventaja de la maceración en frío consiste en que al ser sólo con agua se logran extraer toda la esencia de lo que se macera, sin alterarla en lo más mínimo.

*Maceración en calor*: el proceso a ejecutar en este tipo de maceración es el mismo que en la maceración en frío, sólo que en este caso puede variar la temperatura del medio por el cual se logra la maceración. Se varía también el tiempo que se desea macerar ya que si se utiliza calor se acelera el proceso de forma que tres meses de maceración en frío corresponde a dos semanas en maceración con calor.

La desventaja de la maceración en calor es que no se logra extraer totalmente de forma pura la esencia del producto a macerar, ya que siempre destruye alguna parte de esta porque muchas veces se trata de compuestos termolábiles (Álvarez, 2001).



## 1.6 Residuales de la cebada, caracterización y usos.

En la elaboración de cerveza, el residual más abundante propiamente dicho es el bagazo de malta, que corresponde aproximadamente el 85% del total de los subproductos generados (Rodríguez, 1999).

La conversión de la cebada en cerveza representa el ejemplo más antiguo y complejo de la humanidad de la enzimología aplicada (Gupta *et al.*, 2010).

La industria cervecera genera relativamente grandes cantidades de subproductos y residuos de bagazo de malta, lúpulo y la levadura. Sin embargo, como la mayoría de estos son productos agrícolas, pueden ser fácilmente reciclados y reutilizados. Así, en comparación con otras industrias, la industria cervecera tiende a ser más respetuosa del medio ambiente (Ishiwaki *et al.*, 2000).

La composición química del bagazo de malta varía según la variedad de cebada, la cosecha, malta y maceración condiciones y la calidad y el tipo de complementos añadido en el proceso de elaboración de la cerveza (Huige, 1994; Santos *et al.*, 2003), pero en general, el bagazo se considera como un material lignocelulósico ricos en proteínas y fibra, que representan alrededor del 20% y 70% de su composición, respectivamente.

El bagazo de malta puede ser empleado ya sea como un residuo húmedo, poco después de la separación del mosto o como material secado (Townesley 1979; Ozturk *et al.*, 2002). Según Huige (1994), el bagazo es un ingrediente excelente de alimento para los rumiantes, ya que puede ser combinado con fuentes de nitrógeno de bajo costo, como la urea, para proporcionar todos los aminoácidos esenciales. Además de su alto valor nutritivo, promueve una mayor producción de leche sin afectar la fertilidad de los animales (Reinold, 1997). Según el trabajo investigativo de Kaur *et al* (2004), el bagazo fue evaluado como un reemplazo de salvado de arroz en una dieta de pescado y observó que los peces alimentados con una dieta que contiene el salvado de arroz y 30% de bagazo de malta tuvo una ganancia de peso corporal superior en comparación con los peces alimentados sólo con salvado de arroz.

Según Roberts (1976), la reutilización del bagazo de malta en el proceso de elaboración de la cerveza podría ser atractiva desde el punto de vista de la economía cervecera. Roberts demostró que un extracto de bagazo es eficaz como agente antiespumante en el fermentador, además, la utilización del lúpulo se ha mejorado y las propiedades de la cerveza final no se vieron afectadas





cuando se agregó el extracto del bagazo. Además la adición de bagazo no tratado al mosto se hizo con el objetivo de mejorar el rendimiento de la fermentación de la levadura (Gupta *et al.*, 2010), pero el aroma y el sabor de la cerveza como resultado no fue satisfactorio.



## Capítulo 2. Parte experimental

### 2.1 Materiales y métodos.

El trabajo experimental se llevó a cabo en la Planta de Alcoholes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas.

Se utilizó la línea de fabricación de cerveza de dicha planta ya que el trabajo de investigación está encaminado a la posibilidad de obtención de una bebida alcohólica con características organolépticas a la cerveza, pero la utilización de las materias primas principales no es tal que se pueda nominar como una cerveza auténtica.

El estudio y la experimentación de este trabajo se centraron específicamente a la etapa de maceración que al utilizar materias primas relativamente no tradicionales implican transformaciones en este período del proceso.

El equipo principal de esa etapa lo constituyó el macerador para las corridas experimentales con las características siguientes: tanque cilíndrico cuyo material es de acero inoxidable; el mismo presenta un agitador de paletas colocado de forma concéntrica y acoplado a un motor el cual le proporciona la rotación, el sistema de calentamiento está constituido por una resistencia que recubre una parte exterior del equipo.

Las dimensiones del tanque son:

Diámetro (D) = 0.304 m

Altura total (H) = 0.40 m

Diámetro impelente ( $D_a$ ) = 0.076 m

Volumen (V) = 20 L

Las principales materias primas utilizadas fueron:

Bagazo de malta (afrecho) procedente como residual de la Planta de Alcoholes de la Facultad de Ingenierías de la Universidad de Matanzas (Planta Piloto) y cuya caracterización se le realizó según las técnicas operativas regidas por el Método Standard que desarrolla el laboratorio central del Instituto de Investigación de la Industria Alimenticia (IIA) y los valores resultantes están contenidos en la Tabla No 3.1.



Mediante un estudio de dicha caracterización se buscó la materia prima más conveniente a través de la información de la bibliografía consultada y resultó ser el jugo de caña el adecuado para este caso, cuyos resultados de su caracterización están justificados en la Tabla No.3.2. Se utilizó la variedad (*Ja 60-5*), obtenido de la estación experimental de investigaciones de la caña de azúcar de Jovellanos, provincia de Matanzas.

Otro elemento imprescindible para el proceso es el agua, que aquí no va a recibir ningún tratamiento previo.

Otro material importante en el proceso cervecero es el lúpulo fue utilizado el tipo mixto *humulus lupulus*.

➤ **Materiales auxiliares en la etapa de maceración**

- Enzimas (Papaína y Termamyl LC)
- Ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) de 0.1N
- Solución de Yodo (0.02N)
- Tierra infusoria
- Filtros de prensa de 0,1 mm de espesor de tela filtrante
- Placa de porcelana
- Balanza analítica de marca SCIENTECH
- pH-metro de marca TM4
- Termostato: para la transmisión de calor en la chaqueta del macerador
- Pipetas volumétricas
- Refractómetro de Abbe de marca TM0030
- Cámara fría
- Carbonatador
- Bomba de vacío de marca MLW

La forma de operar del equipo para la investigación fue discontinúa similar a un reactor de tanque agitado y su agitador se fue operado a una velocidad del impelente de 128 rpm constante para cada corrida.



Los parámetros de operación para el macerador son muy importantes ya que tienen gran influencia en los requisitos de calidad del mosto obtenido para la etapa de fermentación y finalmente de la bebida deseada.

Para esta investigación en particular en que se utilizó bagazo de malta y jugo de caña se modifica el procedimiento ya que las composiciones de estas nuevas materias primas modifican lo que tradicionalmente se viene haciendo en un proceso cervecero normal porque al final lo que se quiere aprovechar es la tecnología cervecera.

## **2.2 Diseño experimental**

La dirección principal que se siguió en el diseño experimental fue determinar la mejor combinación en cuanto a la composición de la mezcla de materias primas (afrecho de cebada, jugo de caña y agua) de entrada al macerador que está limitada a una densidad de 10 a 11°Brix y a la capacidad de este equipo experimental (20 L), donde esta combinación proporcione un mosto con la cantidad de material nitrogenado amínico libre (NAL), aportada por la actividad enzimática de las proteínas que posee el bagazo de malta en este proceso. Se determina por el método de ninhidrina.

Otro parámetro que determinó la mejor composición de esta mezcla es el pH que debe adquirir este mosto.

Estos dos factores son determinantes en la etapa de fermentación porque decidirán el éxito de esta segunda etapa del proceso.

En la combinación de temperaturas de reacción y agitación siempre es conveniente medir a aquellos valores de temperaturas necesarias para mantener el valor requerido dentro del equipo que determina la reacción, y así este parámetro también formó parte de otra variable dependiente dentro de la experimentación, con vistas a producciones mayores.

En cada experimento se estableció los siguientes pasos y se realizaron tres réplicas y los valores reportados son promedios.

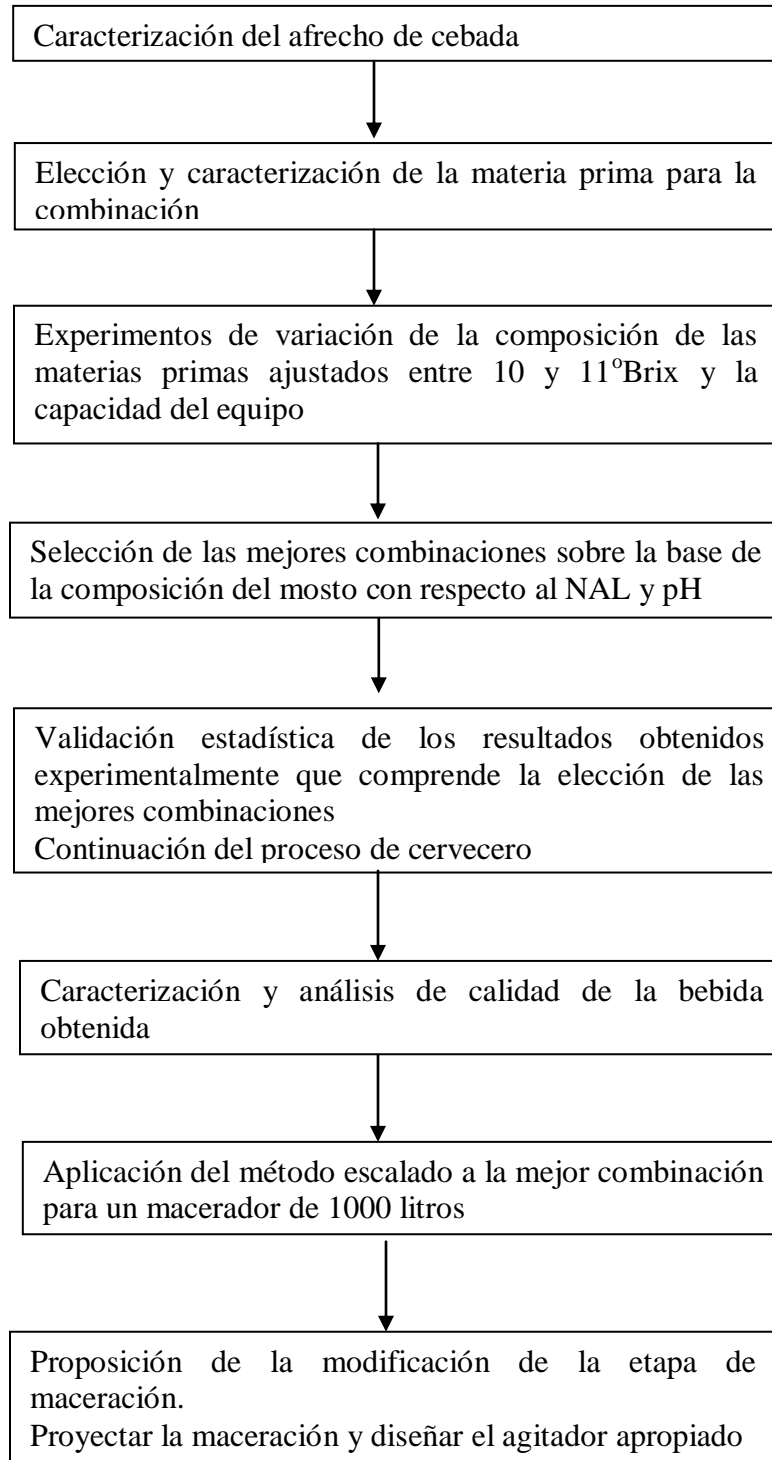
## **2.3 Metodología de la investigación**

El proceso cervecero está constituido por cinco etapas fundamentales en las que ocurren las diferentes transformaciones necesarias para la elaboración de un determinado tipo de cerveza (Verhoef, 2003). Para el desarrollo de este trabajo investigativo se tuvo como base fundamental la



tecnología general del proceso cervecero y está enmarcado en la etapa de maceración, la cual constituye una estación fundamental en el proceso de producción de la bebida.

- **Esquema de la metodología de investigación.**





### 2.3.1 Proceso de maceración para la experimentación

Como ya se ha expresado, la maceración es el proceso que se realiza para lograr la degradación del almidón por medio de reacciones enzimáticas.

El procedimiento de maceración para una corrida consistió en lo siguiente:

- Preparar la mezcla del jugo de caña, bagazo de cebada malteada y agua. Medir el grado Brix inicial de la mezcla.
- Elevar la temperatura a 56 °C, añadir 2 ml de Papaína (enzima responsable de la degradación proteica) y mantenerse por un tiempo de 30 minutos para su hidrólisis.
- Elevar la temperatura a 85 °C y añadir 2 ml de amilasa termoestable (Termamyl) para degradar restos de almidón a azúcares fermentables manteniendo esta temperatura hasta que se transforme todo el almidón (comprobando con la prueba de Yodo).
- Y por último elevar y mantener la temperatura de ebullición de la mezcla durante 60 minutos donde es adicionado el lúpulo. La carga total de esta sustancia fue adicionada en tres partes siguiendo recomendaciones ya comprobadas para garantizar un amargor en la bebida final de 18 a 22 U.A. (unidades de amargor = mg de isohumulonas/L.) y el aroma característico de la cerveza.

1ra adición 20 gramos 10 minutos después de comenzar a hervir el mosto.

2da adición 5 gramos 40 minutos después de comenzar a hervir el mosto.

3ra adición 5 gramos a los 10 minutos antes de concluir la ebullición.

Este proceso de ebullición proporciona la estabilidad al mosto en cuatro sentidos: biológico, bioquímico, coloidal y sabor.

La prueba de Yodo se realiza en intervalos de 5 a 10 minutos hasta que se haya degradado totalmente el almidón y consiste en la adición de dicho reactivo a una cantidad de muestra en la placa de porcelana, la presencia de almidón se caracteriza por el color azul violeta (positivo) y la ausencia por el color amarillo (negativo).



Se realizó el mismo procedimiento para cada replica y corrida en que todos los parámetros se mantuvieron constantes variando solamente el por ciento de cada combinación de Afrecho, jugo de caña y agua.

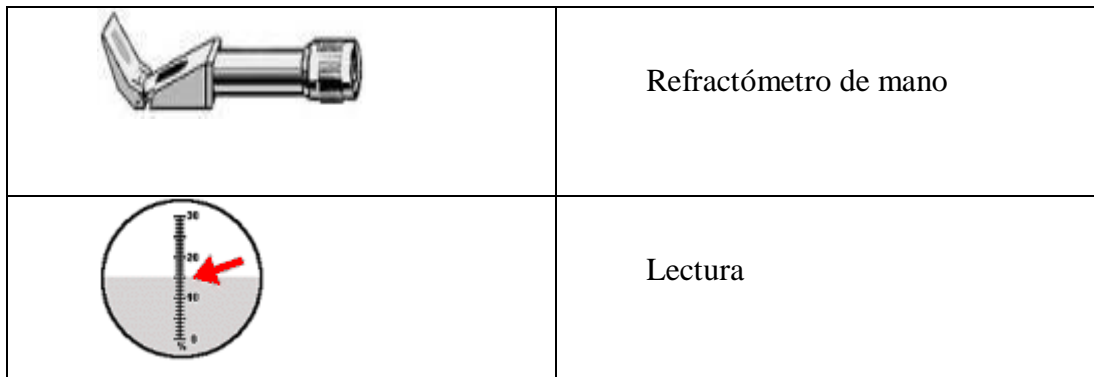
Las combinaciones en función de afrecho de cebada, jugo de caña y agua que se ensayaron están expresadas en cada experimento de la forma siguiente:

**Tabla No 2.1 Composición de las materias primas para cada experimento**

	<b>Afrecho de cebada (kg)</b>	<b>Jugo de caña (L)</b>	<b>Agua (L)</b>
<b>Experimento No 1</b>	<b>0</b>	<b>13</b>	<b>5</b>
<b>Experimento No 2</b>	<b>0.5</b>	<b>12</b>	<b>5</b>
<b>Experimento No 3</b>	<b>1</b>	<b>11.5</b>	<b>4.5</b>
<b>Experimento No 4</b>	<b>1.5</b>	<b>11</b>	<b>4</b>
<b>Experimento No 5</b>	<b>2</b>	<b>10.5</b>	<b>3.5</b>
<b>Experimento No 6</b>	<b>2.5</b>	<b>10</b>	<b>3</b>

Estas composiciones fueron conformadas sobre la base del afrecho como sustancia determinante y para una densidad inicial de la mezcla entre 10 y 11°Brix

Para las mediciones del Brix se empleó un Refractómetro de Abbe que se muestra en la Figura No 2.1 se ilustran las partes principales de este equipo.





*Figura No 2.1 Refractómetro de Abbe.*

Una vez procesado cada combinación experimental en el macerador, el análisis de la composición del mosto en cuanto a NAL y pH se recogen en la Tabla No 2.2:

***Tabla No 2.2 Resultados promedios obtenidos en la maceración de bagazo de malta, a distintas concentraciones, con jugo de caña por medio de enzimas exógenas.***

	Kg de afrecho/20 L de mosto	Valores promedios	
		NAL (mg/L)	pH
<b>Experimento No 1</b>	0	13	2,5
<b>Experimento No 2</b>	0,5	28	3,0
<b>Experimento No 3</b>	1,0	68	3,7
<b>Experimento No 4</b>	1,5	109	4,2
<b>Experimento No 5</b>	2,0	154	4,8
<b>Experimento No 6</b>	2,5	186	5,3

Para evaluar la aceptación de la bebida obtenida habiéndose cumplido los requisitos para el mosto de la etapa de maceración se aplicaron métodos de evaluación sensorial apropiados a dicha bebida.





## 2.4 Especificaciones organolépticas.

- **Aspecto**

A una temperatura igual o mayor que 5°C, el producto tendrá un aspecto transparente y estará libre de turbidez y partículas en suspensión o sedimentadas, apreciables a simple vista. A temperaturas inferiores, el producto podrá presentar un ligero enturbiamiento que será más intenso a medida que la temperatura disminuya y que desaparecerá con el calentamiento.

- **Olor y sabor**

Característico, color que va del amarillo claro al ámbar oscuro, libre de olor o sabor a oxidación, a fermentación y sustancias extrañas. Puede tener un ligero sabor dulce generado por los azúcares fermentables residuales del jugo de caña, así como un aroma en el que se destacan tanto el olor del lúpulo.

- **Espuma y burbujas**

El producto formará una espuma compacta, de finísimas burbujas, persistente y que tienda a adherirse a las paredes del recipiente debido a la presencia del CO<sub>2</sub> generado por la levadura y/o por la carbonatación. La calidad de esta se determina aplicando la técnica de estabilidad de espuma (Hughes, 2003), la cual dice: se toma una botella de cerveza (350 ml), se coloca a una altura de 4 cm con respecto a la parte superior de un vaso de cristal, luego se vira la botella hasta posición horizontal vertiendo su contenido en el vaso. Cuando cesa la salida del líquido se endereza la botella y se comienza a medir el tiempo hasta que desaparece la espuma. Teniendo en cuenta este tiempo la espuma se clasifica en:

- Mayor de 5 minutos: excelente.
- De 3 minutos a 5 minutos: muy buena.



- De 2 a 3 minutos: buena.
- Menos de 2 minutos: mala.

Las características del nuevo producto derivado del proceso aquí presentado hacen que sea apto para el consumo humano y atractivo para el consumidor debido a que cuenta con características organolépticas similares a las de la cerveza tradicional de cebada malteada, pero además es menos costoso. También representa, al mismo tiempo, una nueva opción para el aprovechamiento del bagazo de cebada malteada.

## **2.5 Evaluación sensorial.**

Se utilizó el método de Kendall para realizar la evaluación sensorial, teniendo en cuenta dos muestras para ello se analizó dulzor, amargor, carbonatación, color y aroma. Se estableció una calificación de cero (0= disgusto total) a cinco (5= excelente) comparando con muestra (cerveza) nacional. El panel sensorial fue compuesto por 10 probadores de ambos sexos. Las muestras (codificadas con 3 dígitos) fueron servidas en un vaso de desecho y estaban a temperatura de 5 °C.

### **2.5.1 Método Kendall.**

Este método consiste en la recopilación o recogida de información ponderada de un grupo de expertos. El método unifica el criterio de varios especialistas con conocimiento de la temática, de manera que cada integrante del panel (se debe trabajar con 7 expertos como mínimo) haya ponderado según el orden de importancia, que cada cual entienda a criterio propio. En la selección del experto se tendrá en cuenta la experiencia, el nivel de información que pueda aportar y el nivel técnico que tenga. Este método posee un procedimiento matemático y estadístico que permite validar la fiabilidad del criterio de los expertos mediante el coeficiente Kendall (Santos 2007).

#### **Aplicación del método.**

- Llevar a la tabla el resultado de la votación de cada experto.
- Sumatoria de todos los valores por fila.



- Cálculo del coeficiente (T).

$$T = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k a_{ij}}{k}$$

- Se realiza el control de las características cuyo valor es menor que (T).

- Cálculo de  $\Delta$ , se hace por fila y uno por uno.

$$\Delta = \sum_{i=1}^m a_i - \bar{T}$$

- Cálculo de  $\Delta^2$ , se calcula la sumatoria al final de la columna.

- Posteriormente se determina el coeficiente de Kendall (W).

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^k \Delta_j^2}{m^2(k^3 - k)}$$

$W \geq 0.5$  Si se cumple hay concordancia y el estudio es válido.

$K \rightarrow$  Número de características.

$m \rightarrow$  Número de expertos.

Si  $W < 0.5$  se repite el estudio, de haber un número de expertos mayor que 7 deben eliminarse los que más variación introducen en el estudio, respetando siempre  $m \geq 7$ . (Santos 2007).





## Capítulo 3 Análisis y discusión de los resultados

### 3.1 Composición de las materias primas.

Como ya se expresó el primer paso de la investigación consistió en la caracterización del residual sólido (afrecho de cebada).

*Tabla No 3.1a. Composición química media del bagazo de malta*

Se hizo seis determinaciones de la composición del bagazo de malta las cuales arrojaron una caracterización estadística de los componentes del bagazo de malta.

	<b>Fibra</b>	<b>Proteína</b>	<b>Carbohidratos</b>
<b>Frecuencia</b>	6	6	6
<b>Media</b>	65.1667	17.0	2.55
<b>Varianza</b>	16.5667	11.6	0.139
<b>Desviación típica</b>	4.07022	3.40588	0.372827
<b>Mínimo</b>	60.0	13.0	2.0
<b>Máximo</b>	70.0	21.0	3.0
<b>Rango</b>	10.0	8.0	1.0



*Tabla No 3.1b. Valores promedios de los componentes minerales (6 determinaciones)*

<b>Componente mineral</b>	<b>% bagazo seco (mg/kg)</b>
Calcio	3515,0
Sodio	309,3
Potasio	258,1
Magnesio	1958,0
Aluminio	36,0
Hierro	193,4
Bario	13,6
Estroncio	12,7
Manganeso	51,4
Cobre	18,0
Zinc	178,0
Fósforo	5186,0
Azufre	1980,0
Cromo	5,9
Silicio	10740,0



*Fig. No 3.1 Bagazo de cebada malteada*



Como se observa en la Tabla No 3.1a del bagazo de malta tiene 65,17 % de fibra la cual es un valor importante pues a ella están asociados algunos componentes aromáticos que se pretenden rescatar en este trabajo. La fibra además es útil porque se utiliza como medio filtrante al final de la maceración.

Un valor importante de 17 % está representado por la proteína que es un componente muy importante pero como tal, la levadura no puede utilizarla directamente en su metabolismo, necesita ser hidrolizada hasta aminoácidos o péptidos pequeños. Los aminoácidos, expresados como NAL son muy necesarios en todas las rutas metabólicas pues en ellas la catálisis enzimática es insustituible y las levaduras solo pueden sintetizar estas enzimas si tienen un patrón completo de los aminoácidos necesarios. Por otra parte, valores bajos de NAL implican una síntesis incrementada de alcoholes superiores que alteran la calidad organoléptica de cualquier bebida. Además se puede señalar que los péptidos pequeños contribuyen notablemente a la cantidad y calidad de la espuma.

El almidón aunque resulta con un bajo por ciento, es importante removerlo mediante el uso de amilasas termoestables y así convertirlos en azúcares fermentables para facilitar la operación de filtración final en la obtención del producto deseado con una calidad aceptable. Las dextrinas resultantes de la hidrólisis de los almidones, pueden contribuir además a dar una mayor semejanza de esta bebida con la cerveza tradicional.

Los valores de minerales presentes en el bagazo de malta son, en todos los casos suficientes para el desarrollo normal de las levaduras. Las cantidades de zinc, calcio, magnesio, fósforo y azufre son muy importantes pues son componentes básicos de las enzimas o realizan actividades como cofactores inorgánicos en las rutas metabólicas.

Para la selección de la materia prima acompañante al bagazo de malta se realizó el experimento No 1 (sin contenido de afrecho) que sirvió de control para el proceso, y así se comprobó el aporte del jugo de caña a la bebida que se desea obtener.

Los resultados que arrojó el experimento No 1 decidieron a seleccionar dicha materia prima como complementaria y de hecho se realizó su caracterización.

La determinación de la composición del jugo de caña (variedad Ja 60-5) se desarrolló en el Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Los



valores que se muestran en la Tabla No 3.2 son promedios de 4 replicas realizadas a cada parámetros representados.

**Tabla No 3.2 Composición media del jugo de caña de azúcar**

<b>Componentes</b>	<b>Porcentaje %</b>
Agua	61
Sacarosa	22
Fibra	13
Proteína	3
Glucosa	0,4
Fructosa	0,4
Sales	0,6
Ácidos orgánicos	0.4
Almidón	0,006
Otros	0,5

Resulta interesante destacar que la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo. El jugo de la caña de azúcar contiene pequeñas cantidades de almidón, aproximadamente entre 50 y 70 mg/L, en forma de gránulos, los cuales durante la molienda se separan del tejido vegetal. Estas pequeñas cantidades de almidón pueden implicar perturbaciones en las operaciones de filtración. El uso de la amilasa termoestable al final la maceración actúa no solo sobre los almidones del bagazo de malta, sino también sobre los que provienen del jugo de caña, contribuyendo en alguna medida al incremento de las concentraciones de azúcares fermentables y a la producción de dextrinas específicas.

La utilización del jugo de caña sirvió principalmente para sustituir la cantidad de azúcares fermentables que en el proceso cervecero lo aporta la cebada malteada en la etapa de maceración y como se refleja en la Tabla No 3.2 el por ciento es aceptable para tales fines.





## 3.2 Resultados experimentales del proceso de maceración

Se realizó seis corridas con tres replicas cada una a escala de banco que consistieron en la obtención de mostos aromatizados. Cada corridas se hizo en diferentes proporciones de materias primas para poder ajustar el contenido de azúcares fermentables y nitrógeno amínico libre (NAL) asimilable por la levadura que aporta cada uno de ellas al mosto. Se realizó con el objetivo de buscar la mejor combinación que está en el rango de NAL y pH permitidos teniendo en cuenta la próxima etapa del proceso y así obtener un producto de características organolépticas similares a la cerveza según las normas que establecen el rango de los parámetros finales de la misma.

### 3.2.1 Análisis de los resultados obtenidos en la maceración

La Tabla No 2.2 demuestra que a medida que se va aumentado el valor de afrecho en el proceso se va acercando al intervalo de 150 a 250 mg/L de NAL requerido para la etapa de fermentación. Por lo tanto los experimentos No 5 y No 6 son los que cumplen al menos con este requisito y sus respectivos pH también son representativos.

No obstante estadísticamente se les realizaron a los resultados un análisis estadístico de regresión simple, a través del software STATGRAPHICS Plus 5.1, para conocer el componente de mayor dependencia en el proceso y cuya variación se hizo significativa en los parámetros del producto final.

El análisis de regresión paso a paso arrojó que la cantidad de NAL está estrechamente relacionada con la cantidad de afrecho ya que la ecuación del modelo ajustado fue:  $NAL = -13.2 + 81.2 * \%Afrecho$ . A partir de una dosis de 2 kg se empezó a obtener valores normados de NAL.

La relación entre NAL y % Jugo de caña responde a la ecuación del modelo ajustado:  $NAL = 1001.8 - 81.2 * \% Jugo de caña$

Y por último la relación entre NAL y % Agua corresponde a la ecuación del modelo ajustado:  $NAL = 433.4 - 81.2 * \% Agua$



Las últimas dos ecuaciones corresponde a líneas rectas de pendientes negativas que significa que para un aumento de estas variables repercute en una disminución del NAL peligrando que este salga del rango permisible.

En el caso del otro parámetro que es el pH se procedió estadísticamente de la misma forma que el NAL para la obtención de los valores normados y las respectivas correspondencias matemáticas fueron las siguientes:

$$pH = 2.52 + 1.12 * \% \text{Afrecho}$$

$$pH = 16.52 - 1.12 * \% \text{Jugo de caña}$$

$$pH = 8.68 - 1.12 * \% \text{Agua}$$

Como se observa, las ecuaciones representadas entre pH- Jugo de caña y pH- Agua corresponde a líneas rectas de pendientes negativas que significa que para un aumento de estas variables implica una disminución del pH y viceversa.

Los experimentos No 5 y No 6 cumplieron con la Norma Técnica de Cerveceros Latinoamericanos (ALAFACE) que indica el rango de pH normado para la cerveza (entre 4.0 y 6.0).

Con los resultados físicos y estadísticos se reafirman que los experimentos No 5 y No 6 son los más apropiados que rigen con los parámetros normados para que el mosto pueda ser procesado en la etapa siguiente.

Por lo que se decide someter a ambos a las distintas etapas del proceso cervecero.

### **3.3 Características físico-químicas de las bebidas obtenidas:**

Para la comprobación de los análisis hechos anteriormente del mosto aromatizados se hizo una comparación de los resultados de los experimentos No 5 y No 6 con relación a los recomendados según la Norma Técnica de la Asociación Latinoamericana de Fabricantes de Cervezas (ALAFACE, 1999).



**Tabla No. 3.3 Comparación de resultados de bebidas obtenidas.**

Parámetros	Evaluación		Valores Normados
	Exp No 5	Exp No 6	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,9325	0,9815	0,9 – 1,05
pH	4,8	5,3	3,0 – 5,5
Acidez total (% ácido láctico)	0,1	0,8**	0,1 – 0,4
Grado de Alcohol (°GL)	5,2	4,0	4,0 – 6,0
Concentración de CO <sub>2</sub> (% p/v)	2,1	2,0	2,0– 3,5
Amargor (B.U*)	22	19	5 – 70
Color (°Brand)	0,30	0,35	0,3 – 0,4

\*En el sistema internacional se utiliza el Bittering Units.

\*\*La acidez total expresada como ácido láctico de la bebida del experimento No 6 fue de 0.8 %. Valor que no está en el rango indicado por la Norma, se explica por las bacterias lácticas que se encuentran en la bebida joven, desviando el ciclo de formación del alcohol en el momento de la formación de piruvato.

Los valores del experimento No 5 y No 6 fueron los apropiados debido a que están dentro el rango permitido. Las dos combinaciones fueron realizadas para un volumen de trabajo permisible de 20 L, en el caso de la utilización de 2.5 kg de afrecho de cebada (Experimento No 6) se logra obtener un producto que desde el punto de vista fisicoquímico afectado en el adecuado desarrollo de los parámetros como: el amargor, el dulzor y el grado de CO<sub>2</sub> con respecto al experimento No 5 como lo indicado en la Tabla No 3.3. También debido al mejor rendimiento de volumen de mosto para la etapa de fermentación se decidió tomar la concentración de afrecho de cebada del Experimento No 5.

Para valorar los resultados obtenidos en la Tabla No 3.3 considerando como producto final de la investigación, se propone hacer posteriormente una evaluación de la calidad del producto con los parámetros normados y una sensorial utilizando un método estadístico confiable (análisis de regresión).



### 3.4 Evaluación de la calidad de los productos.

Las bebidas obtenidas cumplen con los parámetros de calidad establecidos en la Norma ALAFACE, (1999), mencionados en el Capítulo 2. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Aspecto**

Las bebidas obtenidas tienen un aspecto transparente, libre de turbidez y partículas en suspensión.

- **Olor y sabor**

Presentan olor y sabor característico a la cerveza, con aroma de lúpulo.

- **Espuma**

Bebida del experimento No 6: La estabilidad de la espuma se mantiene durante 5 minutos por lo que se clasifica de excelente.

Bebida del experimento No 5: La estabilidad de la espuma se mantiene durante 3 minutos por lo que se clasifica de muy buena.

La diferencia se justifica por la cantidad de sacarosa presente en la caña azúcar, un aumento en la cantidad de sacarosa corresponde a una disminución de la espuma en el producto final.

- **Color**

Las bebidas presentan un color parduzco, siendo la más clara la del Experimento No 5 (2 kg) con un valor de grado Brand de 0,30 y con 0,35 del Experimento No 6 (2,5 kg) debido al mayor contenido del bagazo de cebada malteada.

- **Índice de pH**

Los valores de los dos experimentos se mantienen en el rango de 4.0 a 6.0



### 3.4.1 Evaluación sensorial.

- Según las características

Con la metodología de Kendall se le realizó una evaluación ponderada a las encuestas realizadas de las características en las dos bebidas introduciendo dentro de esta evaluación a la Bucanero y la Mayabe, y se designaron como parámetros fundamentales: amargor, efecto del anhídrido carbónico, color, sabor y aroma, utilizando como rango de evaluación (0-5).

Para la realización de las encuestas se utilizaron 10 expertos los cuales fueron seleccionados según su experiencia en el tema. Los resultados de las encuestas realizadas a cada experto se encuentran en el Anexo No.1 y la identificación de cada uno de ellos en el Anexo No.2.

Si se tiene en cuenta el cálculo del coeficiente de Kendall (W) que establece que si  $W \geq 0,5$  hay confiabilidad entre los expertos se arrojó como resultado que en todas las evaluaciones existe una buena concordancia entre los expertos.

El cálculo de  $\Delta$  que indica el nivel de importancia de cada parámetro es decir que a medida que  $\Delta$  sea más negativo el parámetro será más importante, se pudo conocer en cada variante, como se comportan las características de cada una y poderlas comparar entre sí.

**Tabla No 3.4: Caracterización de la cerveza Bucanero según panel de expertos.**

Características	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	$\sum A_i$	$\Delta$	$\Delta^2$
Dulzor	5	4	5	4	4	5	5	5	4	4	45	10	108
Amargor	1	2	1	1	1	2	1	1	2	2	14	-21	424
Grado de CO <sub>2</sub>	3	5	4	3	3	4	3	3	5	4	37	2	5,76
Color	3	4	5	3	4	3	5	3	4	4	38	3	11,6
Aroma	5	5	4	3	4	3	5	3	3	4	39	4	19,4
											173		569

T	35
k	5
w	0,5692
m	10



**Tabla No 3.5: Caracterización de la cerveza Mayabe según panel de expertos.**

Características	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	$\sum A_i$	$\Delta$	$\Delta^2$
Dulzor	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1	14	-21	433
Amargor	3	5	4	5	3	4	4	3	3	3	37	2	4,84
Grado de CO2	5	4	3	4	4	3	5	3	5	4	40	5	27
Color	4	4	5	5	4	5	4	4	3	4	42	7	51,8
Aroma	4	4	5	3	5	4	3	5	3	5	41	6	38,4
											174		555

<b>T</b>	35
<b>k</b>	5
<b>w</b>	0,5548
<b>m</b>	10

**Tabla No 3.6: Caracterización de la bebida del Experimento No 5 según panel de expertos.**

Características	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	$\sum A_i$	$\Delta$	$\Delta^2$
Dulzor	3	3	5	3	5	4	4	4	4	3	38	4	16
Amargor	2	2	1	1	1	1	2	1	1	2	14	-20	400
Grado de CO2	3	3	5	1	5	4	5	4	5	3	38	4	16
Color	5	3	4	3	5	4	5	3	4	4	40	6	36
Aroma	5	4	4	3	5	4	5	3	3	4	40	6	36
											170		504

<b>T</b>	34
<b>k</b>	5
<b>w</b>	0,504
<b>m</b>	10



**Tabla No 3.7: Caracterización de la bebida del Experimento No 6 según panel de expertos.**

Características	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	$\sum A_i$	$\Delta$	$\Delta^2$
<b>Dulzor</b>	4	3	3	4	3	3	3	4	5	4	36	1	1,44
<b>Amargor</b>	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	15	-20	392
<b>Grado de CO<sub>2</sub></b>	4	5	4	3	4	3	4	5	4	5	41	6	38,4
<b>Color</b>	4	5	4	3	4	5	3	4	3	5	40	5	27
<b>Aroma</b>	5	4	5	4	4	3	4	5	4	4	42	7	51,8
											174		511

<b>T</b>	35
<b>k</b>	5
<b>w</b>	0,5108
<b>m</b>	10

Según los resultados obtenidos por los expertos se determinó que por las características específicas de cada variante se ubican de la siguiente forma; las cervezas de mejor aceptación entre los expertos fue la cerveza Bucanero y la Mayabe, después el experimento No 5 y la del experimento No 6. Como se muestra en la siguiente Tabla No 3.8:

**Tabla No 3.8 Ubicación de las cervezas según las características.**

Características	Ubicación			
	Primera	Segunda	Tercera	Cuarta
<b>Dulzor</b>	Exp. No 5	Exp. No 6	Mayabe	Bucanero
<b>Amargor</b>	Bucanero	Mayabe	Exp. No 5	Exp. No 6
<b>Grado de CO<sub>2</sub></b>	Bucanero	Mayabe	Exp. No 5	Exp. No 6
<b>Color</b>	Bucanero	Exp. No 5	Mayabe	Exp. No 6
<b>Aroma</b>	Bucanero	Mayabe	Exp. No 6	Exp. No 5

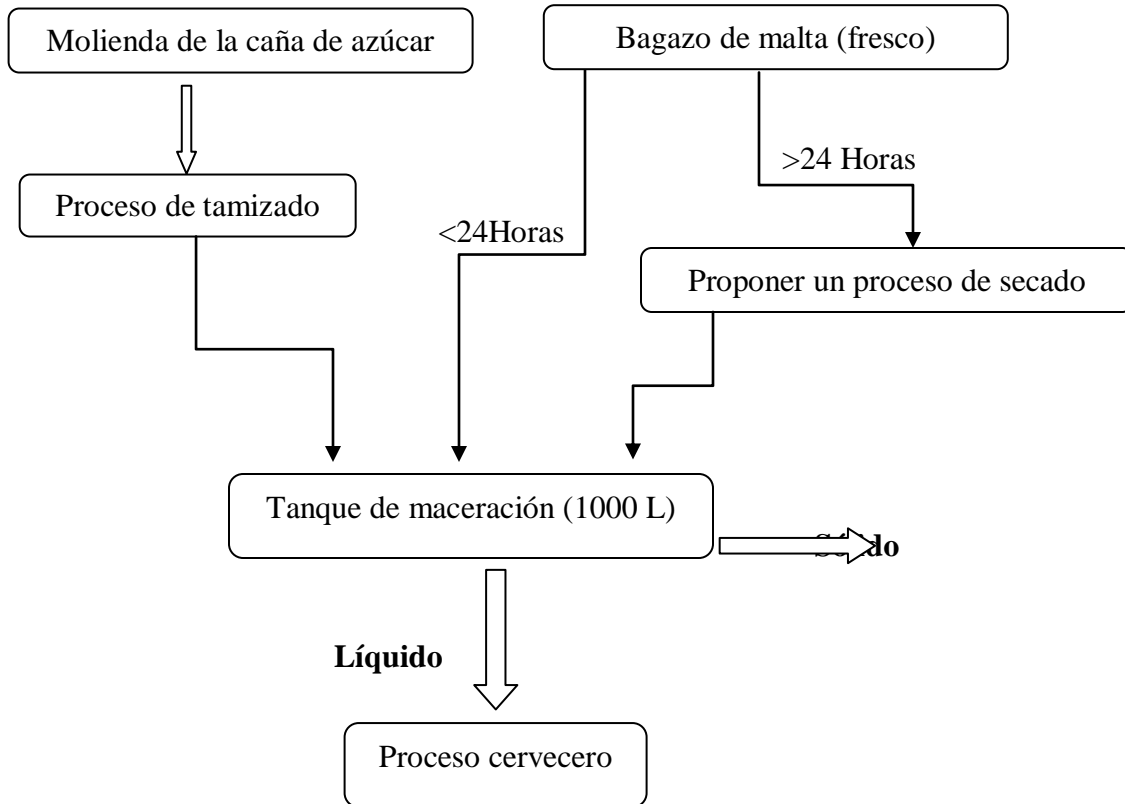
\*Exp: Experimento

Teniendo en cuenta el coeficiente de Kendall (W) para saber la confiabilidad de los expertos se confirma que en las encuestas realizadas hubo concordancia entre los expertos



## Capítulo 4 Proyección preliminar de la etapa de maceración para una planta piloto.

### 4.1 Esquema de la proyección



### 4.2 Molienda de la caña de azúcar

La caña se somete a un proceso de preparación que consiste en romper o desfibrar las celdas de los tallos por medio de picadoras o desfibradoras. La caña preparada alimenta a un sistema de dos molinos en cascada, al primer molino por medio de un transportador de velocidad variable y el bagazo resultante del primer molino es alimentado al siguiente por medio de un transportador que opera a velocidad fija.

El bagazo que sale del último molino, es conducido a las calderas como combustible para generar vapor de alta presión, que se emplea para accionar los turbogeneradores para producir energía y a





los molinos para lograr su movimiento. Los molinos tienen como objeto realizar el proceso de extracción de la sacarosa, que consiste en un sistema de dos cilindros adaptado a un motor.

Se utilizan motores eléctricos para accionar los molinos, ya que la tecnología de estos motores presenta como ventajas mayor facilidad de arranque, de operación y manipulación también mejores características de desempeño dinámico, mejor eficiencia y mayor eficiencia global del proceso de molienda.

El motor se alimenta de energía eléctrica para convertirla en movimiento rotacional.

Las perturbaciones presentes en el proceso de molienda de caña incluyen también efectos como la variedad de la caña, el tipo de cosecha y preparación de la caña, la característica de la fibra y el flujo de bagazo que pasa a través del molino. También afectan las condiciones climáticas y el tipo de terreno, ya que de ello depende la cantidad de materia mineral que esté entrando con la caña.

En el caso que el jugo de caña pasa de su color pardusco al color verde oscuro se puede confirmar que es ácido y turbio. Se debe proceder a su clarificación, diseñada para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, emplea en forma general, cal y agentes de clarificación.

### **Descripción del molino propuesto**

Se trata de un molino de trapiches acoplado a un motor de 10 HP (7.45 Kw), para moler 1.000 a 1200 kg de caña por hora, produce de 500 a 600 litros, ya que se necesita un volumen de 525 L de jugo de caña para el nuevo macerador. Los trapiches son totalmente metálicos. Tiene tres cilindros de molienda dentados, un motor eléctrico y un mecanismo de engranajes para reducir la velocidad y transmitir la potencia desde el motor a los cilindros de molienda.

### **4.3 Tamizado del jugo de caña**

Para el uso del jugo de caña, se le realiza un proceso de tamizado debido a los diferentes tamaños de partículas sólidas provenientes de la fibra durante la molienda. El tamizado es un método físico para separar mezclas. Consiste en hacer pasar una mezcla de partículas sólidas de diferentes tamaños por un tamiz o colador. Las partículas de menor tamaño pasan por los poros del tamiz atravesándolo y las grandes quedan retenidas por el mismo.

Un tamiz es una malla de filamentos que se entrecruzan dejando unos huecos cuadrados. Es importante que esos cuadrados tengan todos el mismo tamaño, ya que éste determinará el tamaño de lo que va a atravesar el hueco, también conocido como "luz de malla". Los gránulos más pequeños irán pasando, lógicamente, de tamiz en tamiz, descendiendo, mientras que los mayores



se irán quedando en los tamices superiores. El tamiz designado fue de 1 mm de diámetro de agujero de acuerdo con su abertura, ya que el diámetro de las partículas del afrecho de la cebada utilizado en el proceso cervecero es mucho mayor. Lo cual impedirá la maceración de bagazo de caña en dicho proceso.

#### **4.4 Escalado del proceso**

Una nueva tecnología, una modificación parcial de alguna etapa de una ya existente o su utilización en la elaboración de otro producto para la cual no fue diseñada, requieren de un tránsito que se extiende desde una investigación y estudio constante a nivel de laboratorio y que no termina así a nivel industrial.

Esta trayectoria está dividida en escala o niveles de investigación en que cada una de ellas tiene sus objetivos muy específicos.

En el escenario de la investigación y el desarrollo de tecnologías está siempre presente la problemática de cómo convertir los conocimientos logrados en un laboratorio, concatenándolos con otros conocimientos ya establecidos, para poder llegar de esa forma a una escala comercial de producción.

Esto se puede realizar exitosamente a través de la explicación de un conjunto de técnicas, metodologías y procedimientos que permitan transferir a la escala industrial, los datos obtenidos en los experimentos a escala reducida.

El método denominado Principio de Semejanza se aplica a los sistemas en los cuales se emplean modelos homólogos (sistema de escala menor) y prototipos (sistema de escala mayor) que solo se diferencian entre sí en el tamaño o escala.

Esta investigación comenzó a una escala laboratorio tipo banco (20L) es que se estudió diferentes parámetros hasta llegar a establecer los mejores valores (aunque no óptimos) de los ensayos.

Ahora en este capítulo sobre la base investigativo que se desarrolló a este nivel, se proyectó el sistema de maceración para el procesamiento de mayores cantidades de materias primas, extrapolando los datos obtenidos a esta escala inferior de aquella combinación que resultó ser la más conveniente con relación a la exigencia del proceso, que fue el experimento No 5.

Pero en este caso se hace necesario introducir en la estación de maceración otros equipos como se muestra en el esquema No 4.1, que no están presentes en un normal proceso cervecero pero esto es producto a las diferenciaciones de las materias primas utilizadas y del producto final obtenido.



Como ya se disoció el eje principal de esta etapa es el macerador por lo que la proyección estuvo encaminada principalmente a su escalado hacia un tanque de 1000 L de capacidad ( $1\text{m}^3$ ), por lo tanto sobre la base de los resultados del modelo obtenido (macerador experimental 20 L) se mantengan en 1000 L.

Lógicamente el método a emplear es el Principio de Semejanza para desarrollar el escalado superior y determinar las dimensiones que tendría este.

Se procedió de la forma siguiente:

❖ **Determinación del factor de escala en que se eligió el volumen de ambos en relación:**

$$f = \frac{V_p}{V_m} = \frac{1000L}{20L} = 50 \quad \text{ec.4.1}$$

Donde:

$V_p$ : volumen del prototipo (escala mayor)

$V_m$ : volumen del modelo.

Según Ulrich *et al.* (2002), esta relación traducida en factor de escala no es recomendable para este tipo de sistema de tanque con agitación. Esto conllevó a emplear un criterio basado en las dimensiones para cambiar el factor de escala ( $f$ ).

Para encontrar un factor de escala apropiado se deben tener las características dimensionales del modelo (macerador de escala menor).

Las relaciones geométricas del modelo (20 L) se establecen como siguen:

$$H_{TM} / D_M = 1.32$$

$$D_M / D_{aM} = 4$$

$$W_M / D_{aM} = 0.2$$

$$H_{oM} / H_M = 0.14$$

$$E_M / D_{aM} = 1$$

$$P_{aM} = 0.19 \text{ kW}$$

$$Rpm = 128 \text{ rpm}$$

$$H_{oM} = 0.05 \text{ m}$$

$$H_M = 0.35 \text{ m}$$

$$D_M = 0.304 \text{ m}$$

$$D_{aM} = 0.076 \text{ m}$$

$$HTM = 0.40 \text{ m}$$



$$W_M = 0.015 \text{ m}$$

Se determina entonces un factor de escala basada en las dimensiones y para esto se buscó la relación entre los diámetros del prototipo y modelo respectivamente:

$$f = \frac{D_P}{D_M} \tag{ec.4.2}$$

No se tiene el diámetro del prototipo ( $D_P$ ) pero sí el volumen a que se desea escalar 1000 L y además es posible calcular la relación:

$$f = \frac{H_{TM}}{D_M} = \frac{0.40\text{m}}{0.304\text{m}} = 1.32 \tag{ec.4.3}$$

De esta relación se calculó el  $D_P$  (diámetro del prototipo) ya que la relación  $\frac{H_{TP}}{D_P} = 1.32$  debe mantenerse igualmente en el prototipo, por lo tanto  $H_{TP} = 1.32 * D_P$  y como se conoce que el volumen debe ser  $1 \text{ m}^3$  entonces:

$$V_P = 0.785 * D_P^2 * H_{TP} \tag{ec.4.4}$$

Así:  $V_P = 0.785 * 1.32 * D_P^3$ , sustituyendo y despejando  $D_P$

$$D_P = \sqrt[3]{\frac{1\text{m}^3}{0.785 * 1.32}} \tag{ec.4.5}$$

$$D_P = 0.99 \text{ m} \approx 1 \text{ m}$$

Por lo que el factor de escala considerado es:  $f = \frac{1}{0.304} = 3.29$

Siendo este valor recomendado por la literatura (2 – 15) para estos casos y a esta escala.

El macerador prototipo 1000 L tuvo las dimensiones siguientes:

$$D_P = 1 \text{ m}$$

$$D_{aP} = 0.25 \text{ m}$$

$$H_{TP} = 1.32 \text{ m}$$

$$H_{OP} = 0.16 \text{ m}$$

$$H_P = 1.16 \text{ m}$$

$$W_P = 0.05 \text{ m}$$

$$E = 0.25 \text{ m}$$



❖ **Cálculo de la potencia consumida por el agitador:**

Para este caso se aplica el criterio de escalado en que se expresa:

$$\left(\frac{P_M}{V_M}\right)_{Modelo} = \left(\frac{P_P}{V_P}\right)_{Prototipo} = cte \quad ec.4.6$$

$$\left(\frac{0.19kW}{0.020m^3}\right)_{Modelo} = \left(\frac{P_P}{1m^3}\right)_{Prototipo}$$

Entonces:  $P_{aP} = 9.5 \text{ kW}$

❖ **Cálculo del rpm del impelente del agitador.**

Se aplicó el criterio de Arquímedes, así se calculó la velocidad del rodete mínima necesaria para mantener las partículas en suspensión:

$$N_P = \frac{2.5}{\pi * D_{aP}} \quad ec.4.7$$

$$N_P = \frac{2.5}{3.14 * 0.25}$$

$N_P = 3.18 \text{ rev/s} \approx 191 \text{ rpm}$

Cálculo de las temperaturas del agua como medio de calentamiento para mantener las temperaturas de reacción dentro del macerador prototipo en cada momento necesario a través de ese criterio:

Para el cálculo del agua de calentamiento:

$$\left(\frac{Q}{V}\right)_{Modelo} = \left(\frac{Q}{V}\right)_{Prototipo} \quad ec.4.8$$

Donde  $Q = U * A * \Delta T$  ec.4.9

con  $\Delta T = T_m - T$

$$\frac{U_P * A_P * (T_{mP} - T_P)}{V_P} = \frac{U_M * A_M * (T_{mM} - T_M)}{V_P} \quad ec.4.10$$



Si se despeja  $T_{mP}$  que representa a la temperatura del medio de calentamiento en cada momento

del proceso de macerador se tiene: 
$$T_{mP} = \frac{U_M * A_M * (T_{mM} - T_M)}{U_P * A_P} * \frac{V_P}{V_M} + T_P$$

Con  $U_P = U_M$ , ya que son los mismos materiales expuesto a la misma temperatura en respectivo caso.

Por lo tanto la ecuación práctica queda: 
$$T_{mP} = \frac{A_M}{A_P} * \frac{V_P}{V_M} (T_{mM} - T_M) + T_P$$

En la Tabla No 4.1 se tienen los resultados de estas temperaturas al medio de calentamiento para cada temperatura necesaria por las que va transitando el proceso.

El área y el volumen se calculan por las expresiones siguientes:

$A = 0.785 * D^2 + (\pi * D * H)$  ec.4.11

$V = 0.785 * D^2 * H$  ec.4.12

**Tabla No 4.1 Temperatura en la chaqueta del macerador.**

$T_{mM}$ (°C)	$T_M$ (°C)	$T_P$ (°C)	$T_{mP}$ (°C)
67	56	56	97
96	80	80	140
138	120	120	187

**Tabla No 4.2 Resumen para los cálculos en el modelo y el prototipo.**

Parámetros (unidades)	Modelo	Prototipo
V (L)	20	1000
$P_a$ (kw)	0.190	9.5
N (rpm)	128	191
$H_0$ (m)	0.050	0.16
H (m)	0.350	1.16
D (m)	0.304	1
$D_a$ (m)	0.076	0.25
$H_T$ (m)	0.400	1.32
W (m)	0.015	0.05



## 4.5 Valores aproximados de los costos de los nuevos equipos para la etapa de la maceración para la planta piloto.

Los costos que a continuación se relacionan fueron establecidos a partir de los índices de costos reportados en CEPCI del año 2011.

Costo del tanque de maceración:

$$Costo_{tanque} = 668,8 * \frac{Ic_{2010}}{Ic_{2003}} * V^{0,54} \quad ec.4.13$$

Entonces para un volumen de 1000 litros,

$$Costo_{tanque} = 38\ 200\ USD$$

Costo del molino de cilindros:

$$\text{Para } P > 1800\ w: Costo_{Molino} = 653,5 * \frac{Ic_{2010}}{Ic_{2003}} * P^{0,56} \quad ec.4.14$$

$$Costo_{Molino} = 2\ 757\ USD$$

### 4.5.1 Otros costos considerados

Costo de consumo de electricidad del agitador:

Para  $P_a = 9.5\ Kw$ ,  $G_e$  tiene un precio de  $0.477\ USD/Kw\ h$  y un tiempo de 3 horas.

$$\text{Entonces, } Costo_{Elect.Agite} = 9.5kW * 0.477USD / kW.h * 3h \quad ec.4.15$$

$$Costo_{Elect.Agite} = 13.59\ USD$$

Costo de consumo de electricidad de la resistencia y el termostato:



Para  $P_{tot} = 3.85 \text{ Kw}$ ,  $G_e$  tiene un precio de  $0.477 \text{ USD/Kw h}$  y un tiempo de 3 horas.

$$\text{Entonces, } Costo_{Elect.Ag\dot{it}} = 3.85Kw * 0.477USD / Kwh * 3h \quad \text{ec.4.16}$$

$$Costo_{Elect.Ag\dot{it}} = 5.51 \text{ USD}$$

## Nomenclatura

Símbolos		Unidades
f	Factor de escala	
V	Volumen del macerador	L
$P_a$	Potencia del agitador	kW
N	Velocidad de impelente	Rpm
H	Altura del macerador	M
D	Diámetro del equipo	M
$D_a$	Diámetro del impelente	M
$T_m$	Temperatura del medio	M
W	Longitud del impelente	M
A	Área	$m^2$
E	Longitud desde el impelente hasta el fondo del equipo.	M



## Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo y los resultados obtenidos se llegan a las conclusiones siguientes:

1. Con el enriquecimiento del bagazo de malta con jugo de caña es posible utilizarlo como materia prima para la obtención de una bebida alcohólica con características organolépticas similares a la cerveza por lo que se verifica la hipótesis planteada de esta investigación.
2. El bagazo de malta fue caracterizado obteniéndose que en su composición los mayores por cientos está en fibra seguido por la proteína y muy bajo contenido de almidón y otros elementos.
3. El jugo de caña de azúcar es apropiado como materia prima para su combinación con el bagazo de malta, por su alto contenido en azúcar fermentable.
4. Se logró establecer a escala banco que con una composición de materia prima conformada por 2 kg de afrecho, 10.5 L de caña y 3.5 L de agua, y siguiendo la tecnología básica de producción de cerveza se logra obtener una bebida alcohólica con características organolépticas similares a ella.
5. Se realizó el escalado para un macerador de 1000 L cuya características geométricas y dimensionales están registradas en la Tabla No 4.2 de este trabajo.
6. Esta investigación ofrece una aplicación de elaboración de bebida alcohólica al nivel de planta piloto al ser, una alternativa apta para el consumo humano y representa una nueva opción para el aprovechamiento del bagazo de cebada malteada.

## **Recomendaciones**

- 1.** Extender el método de escalado al resto del proceso a partir de los resultados de la etapa de maceración.
- 2.** Realizar un análisis económico donde se reflejen los indicadores VAN y TIR al proceso de elaboración de la bebida.
- 3.** Realizar un estudio sobre la posibilidad de utilizar el nuevo sólido residual (afrecho) como alimento animal contribuyendo al desarrollo de tecnología más limpia.
- 4.** Proponer un proceso de secado al bagazo de malta para evitar el desarrollo de la actividad microbiana para un proceso a escala mayor.



## Bibliografía

1. Baik, B.K. and Ullrich, S.E. (2008). Barley for food: characteristics, improvement, and renewed interest-Critical review.
2. Bamforth, C.W. (2006). Scientific principles of malting and brewing.
3. Bartolome, B., Santos, M., Jiménez, J.J., Del-Nozal, M.J. and Gómez-Cordovés, C. (2002). Pentoses and hydroxycinnamic acids in brewers' spent grain.
4. Bartolome B., Gomez-Cordoves, C., Sancho AI, Diez N., Ferreira P., Soliveri J. and Copa-Patiño J.L. (2003). Growth and release of hydroxycinnamic acids from brewers spent grain by *Streptomyces avermitilis* CECT 3339.
5. Behall, K.M., Scholfield, D.J. and Hallfrisch, J. (2004). Diets containing barley significantly reduce lipids in mildly hypercholesterolemic men and women.
6. Bradee, L. and Duensing, W. (2002). El cervecero en la práctica. Un manual para la Industria Cervecera, 3ra ed., MBBA. Minnesota, EUA p.87.
7. Briggs, D.E., Boulton, C.A., Brookes, P.A., Stevens, R. (2004). Brewing: Science and Practice. Woodhead Publishing Limited and CCR Press LLC. USA.
8. Brizuela, E. (1987). Aspectos Fundamentales del Diseño de Plantas Industriales. Editorial ISPJAE. Ciudad de la Habana.
9. Bueno, E. (1985). Economía de Procesos. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
10. Carlos, M. (2002). Estudio de la inhibición de la fermentación de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol. In: Departamento de Química e Ingeniería Química. Universidad de Matanzas, Cuba, Pág. 136.
11. Carrillo, R. (2003). Informe técnico al MINAL. C. Habana. ICIDCA.
12. Donaldo, Y.P. (2007). Curso de elaboración y producción de cerveza. [Consultada 26 enero 2011]. Disponible en <http://www.mailxmail.com/curso-elaboracion-produccion-cerveza>.
13. Dragone, G., Almeida e Silva J.B., Silva, D.P., Santos, L. (2002). Elaboração da cervejas en Brasil.
14. Figueroa, V. (1990). La caña de azúcar como base de la producción porcina en el trópico. In: Taller Regional sobre Utilización de los recursos alimenticios en la producción



- porcina en América Latina y el Caribe (Editores: Vilda Figueroa and J Ly) Instituto de Investigación Porcina; Habana, Cuba and FAO; Rome.
15. Filho, W.G.V. (2005). Tecnología de bebidas. 1ª edición. Editora Edgard Blücher. Brasil.
  16. Franklin, C.A. (2004). Estudio de los residuos industriales líquidos y evaluación de las alternativas de mejoras para la Industria Cervecera Valdivia.
  17. Gaiser E., Kottke V, “ High performance plate heat exchangers, “ Chemical Plants & Processing, N° 9 / 1990 – Reproduced for W. Schmidt – Bretten GmbH.
  18. Gupta, M., Abu-Ghannam, N. and Gallagher, E. (2010). Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting, Brewing and Applications of its By-Products. [Consultada: 15 enero 2011]. Disponible en: <http://www.onlinelibrary.wiley.com>.
  19. Hisado, K., Ishii, S., Takoi, K., Mitani, Y. and Shinotsuka, K. (2008). Effects of spent grains or their extract on yeast performance. Pág 187-190.
  20. Hughes, P.L. (2003). Cerveza: Calidad, higiene y características nutricionales.
  21. Huige, N.J. (1994). Brewery by-products and effluents. In: HardwickWA, editor. Handbook of brewing. New York: Marcel Dekker. Pág.50-61.
  22. Ishiwaki, N., Murayama, H., Awayama, H., Kanauchi, O., Sato T. (2000). Development of high value uses of spent grain by fractionation technology.
  23. Izydorczyk, Marta. (April 2002). Evaluation of Contributions of Barley Polysaccharides, as Value added Components, to Functional Properties of Model Starch and Food Systems. Canada-Manitoba Agri-Food Research and Development Initiative. [Consultada: 24 Julio 2010]. Disponible en: <http://www.gov.mb.ca/agriculture/research/ardi/projects/98-013.html>.
  24. Jackson, Michael. (1999). El libro de la cerveza.
  25. Kaur, V.I., Saxena, P.K. (2004). Incorporation of brewery waste in supplementary feed and its impact on growth in some carps.
  26. Keenan, J.M., Coulson, M., Shamliyan, T., Knutson, N., Kolberg, L., Curry, L. (2007). The effects of concentrated barley  $\beta$ -glucan on blood lipids in a population of hyper cholesterolaemic men and women.
  27. Kunze, W. (1999). Technology Brewing and Malting. 2<sup>nd</sup> edition. VLB Berlin, Germany.



28. Lekkas, C., Stewart, G.G., Hill, A.E., Taidi, B. and Hodgson, J. (2007). Elucidation of role of nitrogenous wort components in yeast fermentation. *Inst. Brew.* 113
29. Lewis, M.J and Bamfosth, C.W. (2006). *Essays in Brewing Science*. SpringerScience +Business Media, LLG New York.
30. Martín, Carlos. (2002). Estudio de la inhibición de la fermentación de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol. In: Departamento de Química e Ingeniería Química. Universidad de Matanzas, Cuba, Pág. 62-76.
31. Martín, C., Almazán, O., Marcet, M., Hernández, E. (2001) Pretratamiento al vapor del bagazo de caña de azúcar para su uso como materia prima para la producción de etanol. *Revista ATAC*, 62, 31-37.
32. Martín, P.A. (1978). Cereal and sugar adjuncts *Brewers' Guardian*.
33. Mc Cabe, W.L., Smith, J.C. y Harriott, P. (1985). *Unit Operations of Chemical Engineering*. 4ª Ed. Mc Graw-Hill International Editions. Nueva York.
34. Molina, J.L., (1989). *La Cebada, Morfología, Fisiología, Genética, Agronomía y usos industriales*. Editorial: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
35. Mussatto, S. I. (2007). Aprovechamiento integral del subproducto de la industria cervecera en procesos químicos y biotecnológicos. 173 Pág. Tesis de doctorado en Biotecnología industrial.
36. Mussatto, S.I., Dragone, G. and Roberto, I.C. (2006). Brewer's spent grain: generation, characteristics and potential application.
37. Nascimento, R.P., Coelho, R.R.R., Marques, S., Alves, L., Gírio, F.M. and Amaral-Collaco, M.T. (2002). Production and partial characterisation of xylanase from *Streptomyces* sp. strain AMT-3 isolated from Brazilian cerrado soil.
38. Newman, C.W. and Newman, R.K. (2006). A brief history of barley foods.
39. Newman, R.K. and Newman, C.W. (1991). Barley as a food grain.
40. Norma de la Asociación Latinoamericana de Fabricación de Cerveza. ALAFACE (1999).



41. Ozturk, S., Ozboy, O., Cavidoglu, I., Koksel, H. (2002). Effects of brewers' spent grain on the quality and dietary fibre content of cookies.
42. Roberts, R.T. (1976). Use of an extract of spent grains as an antifoaming agent in fermentors.
43. Rodríguez, S. J. (1999). Caracterización del afrecho de malta y su empleo en productos horneados. Universidad Politécnica de Valencia.
44. Rosabal, V.J. y Matos, V.M. (1998). Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. ENPES. Cuba.
45. Sangeetha, P.T., Ramesh, M.N. and Prapulla, S.G. (2004). Production of fructosyl transferase by *Aspergillus oryzae* CFR 202 in solid-state fermentation using agricultural by-products.
46. Santos, M., Jimenez, J.J., Bartolome, B., Gomez-Cordovés, C., Del-Nozal, M.J. (2003). Variability of brewers' spent grain within a brewery.
47. Schildbach, R., Ritter, W., Schmithals, K. and Burbidge, M. (1992). New developments in the environmentally safe disposal of spent grains and waste kieselguhr from breweries.
48. Slavin, J. (2003). Why whole grains are protective: biological mechanisms. And *Pleurotus ostreatus* cultivated on spent beer grain.
49. Tellows, P. (1994). Tecnología del procesado de los alimentados, principios y prácticas. Editorial Acribia, S.A. España.
50. Townsley, P.M. (1979). Preparation of commercial products from brewer's waste grain and trub.
51. Ulrich, C.D., David, A.H., Mark, B.M. y Peter, D.T. (2002). Use of HEL Auto-mate and Simulation Techniques for rapid and safe Transfert to pilo Plant form from laboratory.
52. Verhoef, B. (2003). La enciclopedia de la cerveza.



## Anexos

### Anexo No 1: Tablas de encuestas.

➤ Experto1:

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
Bucanero	5	1	3	3	5
Mayabe	1	3	5	4	4
Exp. No 5	3	2	3	5	5
Exp No 6	4	1	4	4	5

➤ Experto 2:

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
Bucanero	4	2	5	4	5
Mayabe	2	5	4	4	4
Exp. No 5	3	2	3	3	4
Exp No 6	3	2	5	5	4

• Experto 3:

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
Bucanero	5	1	4	5	4
Mayabe	1	4	3	5	5
Exp. No 5	5	1	5	4	4
Exp No 6	3	1	4	4	5

➤ Experto 4:

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
Bucanero	4	1	3	3	3
Mayabe	2	5	4	5	3
Exp. No 5	3	1	1	3	3
Exp No 6	4	2	3	3	4



➤ **Experto 5:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	4	1	3	4	4
<b>Mayabe</b>	1	3	4	4	5
<b>Exp. No 5</b>	5	1	5	5	5
<b>Exp No 6</b>	3	1	4	4	4

➤ **Experto 6:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	5	2	4	3	3
<b>Mayabe</b>	1	4	3	5	4
<b>Exp No 5</b>	4	1	4	4	4
<b>Exp No 6</b>	3	2	3	5	3

➤ **Experto 7:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	5	1	3	5	5
<b>Mayabe</b>	2	4	5	4	3
<b>Exp. No 5</b>	4	2	5	5	5
<b>Exp No 6</b>	3	1	4	3	4

➤ **Experto 8:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	5	1	3	3	3
<b>Mayabe</b>	2	3	3	4	5
<b>Exp. No 5</b>	4	1	4	3	3
<b>Exp No 6</b>	4	2	5	4	5

➤ **Experto 9:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	4	2	5	4	3
<b>Mayabe</b>	1	3	5	3	3
<b>Exp. No 5</b>	4	1	5	4	3
<b>Exp No 6</b>	5	2	4	3	4





➤ **Experto 10:**

Muestras	Dulzor	Amargor	Carbonatación	Color	Aroma
<b>Bucanero</b>	4	2	4	4	4
<b>Mayabe</b>	1	3	4	4	5
<b>Exp. No 5</b>	3	2	3	4	4
<b>Exp No 6</b>	4	1	5	5	4

**Anexo No 2 Expertos utilizados en la evaluación sensorial.**

Expertos	Calificación	Cargo
Joao Batista Almeida.	Dr. Profesor titular. Investigador Titular.	Dtor. Escuela de Ingeniería de Loners. Especialista en Bebidas Fermentadas. Brasil.
Raúl Carrillo.	Licenciado.	Especialista principal de la Planta de Bebidas Fermentadas del IIA de Ciudad de la Habana.
Orelbis Rodríguez.	Licenciado.	Investigador de la Planta de Bebidas Fermentadas del IIA de Ciudad de la Habana.
Misladis Ricardo M.	Licenciada.	Especialista de calidad de La EMBELI de Matanzas.
Alberto Pestano.	Licenciado.	Especialista d bebidas y licores de La EMBELI de Matanzas.
Mireya Pérez Rodríguez.	Licenciada.	Especialista de calidad de la Empresa de Bebidas y refrescos del municipio de Jovellanos.
Gerardo Ascunce del Sol.	Licenciado.	Jefe del Laboratorio de Microbiología de la Planta “Libertad” del municipio de Colon.
Margarita Alfonso Leal.	Ingeniera.	Especialista de calidad de la Planta Libertad, Colon.
Marcelo Enrique Marcet.	Dr. y profesor titular.	Jefe del Laboratorio de Bebidas Fermentadas de Matanzas Cuba.
Milagros Beatón	Máster.	Profesor investigador de bebidas fermentadas. Miembro del grupo de investigación de bebidas fermentadas.



### Anexo No 3: Análisis estadístico.

**Variable a analizar: NAL**

**Análisis de Regresión para el Afrecho**

Variable dependiente: NAL

Variable independiente: %Afrecho

Parámetro	Error Estadístico		T	P-Valor
	Estimación	estándar		
Ordenada	-13.2	9.45093	-1.39669	0.2569
Pendiente	81.2	5.69912	14.2478	0.0007

#### Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	16483.6	1	16483.6	203.00	0.0007
Residuo	243.6	3	81.2		
Total (Corr.)	16727.2	4			

Coefficiente de Correlación = 0.992692

R-cuadrado = 98.5437 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.0583 porcentaje

Error estándar de est. = 9.0111

Error absoluto medio = 6.32

Estadístico de Durbin-Watson = 2.83514 (P=0.0121)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.49064

El StatAdvisor



-----  
 La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre NAL y %Afrecho. La ecuación del modelo ajustado es:  $NAL = -13.2 + 81.2 * \%Afrecho$

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre NAL y %Afrecho para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 98.5437% de la variabilidad en NAL. El coeficiente de correlación es igual a 0.992692, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 9.0111. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.

El error absoluto medio (MAE) de 6.32 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

### **Análisis de Regresión para el Jugo de caña**

-----  
 Variable dependiente: NAL

Variable independiente: % Jugo de caña

-----

Parámetro	Estimación	Error estándar	Estadístico T	P-Valor
Ordenada	1001.8	62.8197	15.9472	0.0005
Pendiente	-81.2	5.69912	-14.2478	0.0007

-----

### **Análisis de la Varianza**

-----  
 Fuente      Suma de cuadrados      GL      Cuadrado medio      Cociente-F      P-Valor

-----



Modelo	16483.6	1	16483.6	203.00	0.0007
Residuo	243.6	3	81.2		
-----					
Total (Corr.)	16727.2	4			

Coefficiente de Correlación = -0.992692

R-cuadrado = 98.5437 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.0583 porcentaje

Error estándar de est. = 9.0111

Error absoluto medio = 6.32

Estadístico de Durbin-Watson = 2.83514 (P=0.0121)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.49064

El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre NAL y % Jugo de caña. La ecuación del modelo ajustado es: **NAL = 1001.8 - 81.2\*% Jugo de caña**

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre NAL y % Jugo de caña para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 98.5437% de la variabilidad en NAL. El coeficiente de correlación es igual a -0.992692, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 9.0111. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.

El error absoluto medio (MAE) de 6.32 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es



inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

### Análisis de Regresión para el Agua

Variable dependiente: NAL

Variable independiente: % Agua

Parámetro	Error Estadístico		T	P-Valor
	Estimación	estándar		
Ordenada	433.4	23.1499	18.7214	0.0003
Pendiente	-81.2	5.69912	-14.2478	0.0007

### Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	16483.6	1	16483.6	203.00	0.0007
Residuo	243.6	3	81.2		
Total (Corr.)	16727.2	4			

Coefficiente de Correlación = -0.992692

R-cuadrado = 98.5437 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98.0583 porcentaje

Error estándar de est. = 9.0111

Error absoluto medio = 6.32

Estadístico de Durbin-Watson = 2.83514 (P=0.0121)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.49064



El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre NAL y % Agua. La ecuación del modelo ajustado es:  **$NAL = 433.4 - 81.2 * \% \text{ Agua}$**

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.01, existe relación estadísticamente significativa entre NAL y % Agua para un nivel de confianza del 99%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 98.5437% de la variabilidad en NAL. El coeficiente de correlación es igual a -0.992692, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 9.0111. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.

El error absoluto medio (MAE) de 6.32 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

### **Variable a analizar: pH**

#### **Análisis de Regresión para el Afrecho**

-----

Variable dependiente: pH

Variable independiente: % Afrecho

-----

Parámetro	Error Estadístico		T	P-Valor
	Estimación	estándar		
Ordenada	2.52	0.403485	6.24559	0.0083
Pendiente	1.12	0.243311	4.60317	0.0193

-----



-----

Análisis de la Varianza

-----

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	3.136	1	3.136	21.19	0.0193
Residuo	0.444	3	0.148		
Total (Corr.)	3.58	4			

-----

Coefficiente de Correlación = 0.935937

R-cuadrado = 87.5978 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83.4637 porcentaje

Error estándar de est. = 0.384708

Error absoluto medio = 0.24

Estadístico de Durbin-Watson = 3.0955 (P = 0.0029)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.67027

El StatAdvisor

-----

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre pH y %Afrecho. La ecuación del modelo ajustado es: **pH = 2.52 + 1.12\*%Afrecho**

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre pH y %Afrecho para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 87.5978% de la variabilidad en pH. El coeficiente de correlación es igual a 0.935937, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.384708. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.



El error absoluto medio (MAE) de 0.24 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

### Análisis de Regresión para el Jugo de caña

Variable dependiente: pH

Variable independiente: % Jugo de caña

Parámetro	Estimación	Error Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	16.52	2.68194	6.15972	0.0086
Pendiente	-1.12	0.243311	-4.60317	0.0193

### Análisis de la Varianza

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	3.136	1	3.136	21.19	0.0193
Residuo	0.444	3	0.148		
Total (Corr.)	3.58	4			

Coefficiente de Correlación = -0.935937

R-cuadrado = 87.5978 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83.4637 porcentaje

Error estándar de est. = 0.384708

Error absoluto medio = 0.24





Estadístico de Durbin-Watson = 3.0955 (P=0.0029)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.67027

El StatAdvisor

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre pH y % Jugo de caña. La ecuación del modelo ajustado es: **pH = 16.52 - 1.12\*% Jugo de caña**

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre pH y % Jugo de caña para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 87.5978% de la variabilidad en pH. El coeficiente de correlación es igual a -0.935937, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.384708. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0.24 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

### Análisis de Regresión para el Agua

Variable dependiente: pH

Variable independiente: % Agua

Parámetro	Estimación	Error Estadístico estándar	T	P-Valor
Ordenada	8.68	0.988332	8.78247	0.0031
Pendiente	-1.12	0.243311	-4.60317	0.0193



-----

Análisis de la Varianza

-----

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	3.136	1	3.136	21.19	0.0193
Residuo	0.444	3	0.148		
Total (Corr.)	3.58	4			

-----

Coefficiente de Correlación = -0.935937

R-cuadrado = 87.5978 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 83.4637 porcentaje

Error estándar de est. = 0.384708

Error absoluto medio = 0.24

Estadístico de Durbin-Watson = 3.0955 (P=0.0029)

Autocorrelación residual en Lag 1 = -0.67027

El StatAdvisor

-----

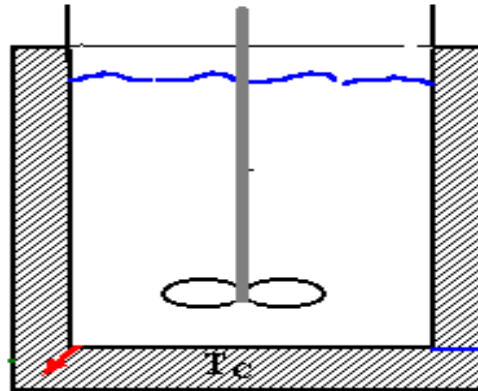
La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre pH y % Agua. La ecuación del modelo ajustado es: **pH = 8.68 - 1.12\*% Agua**

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0.05, existe relación estadísticamente significativa entre pH y % Agua para un nivel de confianza del 95%.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 87.5978% de la variabilidad en pH. El coeficiente de correlación es igual a -0.935937, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0.384708. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción Predicciones del menú del texto.

El error absoluto medio (MAE) de 0.24 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0.05, hay indicio de una posible correlación serial. Represente los residuos frente al orden de fila para ver si hay algún modelo que pueda verse.

#### **Anexo No.4: Representación del tanque de maceración utilizado**



#### **Anexo No. 5: Tamiz del proceso de escalado**



