



# **Determinación de eficiencia de ensayos de fermentación que incorporan efluente de planta de biogás modificando condiciones y formulación del proceso y comparar con la obtenida en ensayos anteriores con el efluente en Planta Experimental**

**Práctica Profesional Supervisada (Cód. 9160)**

Tutor por parte de la universidad: BOLOGNA, María Cristina.

Tutor por parte de la empresa: FROLA, Fabiana.

Lugar de realización: BIOETANOL RIO CUARTO S.A.

Periodo de realización: 02/01/2018 - 06/03/2018

**REINERI, Maicol**

**14 de mayo de 2018**

## Resumen

En el presente informe se describen las tareas realizadas durante la Práctica Profesional Supervisada - PPS - en la empresa Bioetanol Río Cuarto S.A., donde se produce principalmente bioetanol a partir de maíz y los subproductos derivados del proceso.

El principal objetivo de la PPS fue determinar el rendimiento de la obtención de etanol, utilizando maíz como materia prima, con el agregado de determinada proporción de efluentes de la planta de biogás, para luego ser comparados con ensayos anteriormente realizados a escala piloto en las instalaciones de la Planta Experimental consorcio Bio4-UNRC. Dicho objetivo se cumplió de manera satisfactoria, para el cual fue necesario realizar un profundo estudio del proceso, comprender los efectos al modificar variables del sistema, y analizar los resultados obtenidos para cada ensayo.

En la PPS fueron aplicados conocimientos adquiridos a lo largo del cursado de la carrera de Ingeniería Química, además de establecerse vínculos con futuros colegas. Con el transcurso del tiempo en la planta fue necesario asumir diferentes responsabilidades requeridas por el proceso productivo. El resultado de los objetivos planteados ha sido exitoso bajo los requerimientos exigidos, por lo cual se considera satisfactorio y enriquecedor para el crecimiento personal en la experiencia como futuro profesional.

# Índice

<b>Resumen .....</b>	<b>2</b>
<b>Índice .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>5</b>
1.1. <i>Objetivos Generales</i> .....	5
1.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
1.3. <i>Objetivos Alcanzados</i> .....	5
<b>2. Descripción de la empresa .....</b>	<b>6</b>
2.1. <i>Presentación</i> .....	6
2.2. <i>Descripción de la empresa</i> .....	6
2.3. <i>Área de la empresa donde se desarrolla la práctica</i> .....	6
2.4. <i>Organigrama</i> .....	7
2.5. <i>Tecnología y Procesos</i> .....	10
<b>3. Descripción de las tareas realizadas .....</b>	<b>15</b>
3.1. <i>Actividades Realizadas</i> .....	15
3.1.1. Reconocimiento de las instalaciones.....	15
3.1.2. Estudio de las normas que alcanzan el sistema de producción.....	15
3.1.3. Estudio del proceso de producción.....	16
3.1.4. Modificación de instructivos operativos .....	16
3.1.5. Ensayos de fermentación con maíz e incorporación de digestato .....	16
3.1.6. Otras actividades realizadas.....	16
3.2. <i>Resultados y análisis</i> .....	17
3.2.1 <i>Materia prima</i> .....	17
3.2.2. <i>Molienda</i> .....	17
3.2.3. <i>Licuefacción</i> .....	18
3.2.4. <i>Fermentación</i> .....	21
3.2.5. <i>Microbiología</i> .....	26
3.2.6. <i>Determinación de la eficiencia</i> .....	28

<b>4. Conclusión .....</b>	<b>31</b>
<b>5. Bibliografía.....</b>	<b>32</b>
<b>6. Anexos.....</b>	<b>33</b>
<i>Anexo I: Listado de equipos y características: .....</i>	<i>33</i>
Tabla AI.1: Equipos que se encuentran en la Planta Experimental y que fueron utilizados durante el período de prácticas profesionales.....	33
Tabla AI.2: Equipos utilizados en el laboratorio.....	35
<i>Anexo II: Ejemplo de Instructivo Operativo:.....</i>	<i>37</i>
<i>Anexo III: Cálculo de rendimiento: .....</i>	<i>39</i>

# 1. Objetivos

## 1.1. *Objetivos Generales*

- Desarrollar habilidades prácticas propias de la actividad profesional en una planta industrial a escala piloto.
- Analizar el proceso de fermentación de alcohol a partir de maíz con la incorporación de efluente proveniente de la planta de biogás bajo nuevas condiciones.

## 1.2. *Objetivos Específicos*

- Reconocer la planta industrial de la empresa Bio4 y el proceso de producción de bioetanol de maíz.
- Realizar los ensayos experimentales de fermentación en Planta Experimental.
- Analizar el rendimiento de los ensayos de fermentación con la incorporación de efluente proveniente de la planta de biogás y comparar con ensayos anteriores.

## 1.3. *Objetivos Alcanzados*

- Todos los objetivos se cumplieron exitosamente en el tiempo de duración de la Práctica Profesional.

## 2. Descripción de la empresa

### 2.1. Presentación

- Nombre de la empresa: Bioetanol Río Cuarto S.A.
- Domicilio: Avenida Godoy Cruz N° 625, Río Cuarto, Córdoba.
- Teléfono: (0358) 4210620.
- Rubro: Producción de bioetanol a partir de maíz.
- Capacidad instalada: 90000000 l/año.

### 2.2. Descripción de la empresa

Bio4 es una Sociedad Anónima conformada por 28 socios provenientes del sector agropecuario de la región. El objetivo es agregar valor a los granos de maíz producidos en la zona, generando bioetanol como producto principal y burlanda<sup>1</sup> como un subproducto, otorgando grandes beneficios a nivel local y global. Como desecho se puede mencionar al dióxido de carbono como el más importante.

La misión de la empresa es producir biocombustibles de la manera más amigable posible con el ambiente, aportando beneficios económicos y sociales a la región, así como también cumpliendo con todos los requerimientos legales y de sus respectivos clientes.

Bio4 cuenta con una planta experimental, creada bajo un plan del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MINCYT), con fondos del Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC), en colaboración de la Facultad de Ingeniería de la UNRC y la fundación FADA en el ámbito público y FOCSeed S.R.L y Bioetanol Río Cuarto S.A en el ámbito privado.

### 2.3. Área de la empresa donde se desarrolló la práctica

La Práctica Profesional Supervisada se realizó en la Planta Experimental consorcio Bio4-UNRC, que se encuentra dentro del predio de Bioetanol Río Cuarto

---

<sup>1</sup> Burlanda: subproducto que se logra luego de la fermentación controlada de maíz para la obtención de bioetanol.

S.A., cumplimentándose desde el 2 de enero de 2018 hasta el 6 de marzo de 2018.

La jornada de trabajo fue de 4 horas diarias (de 9 a 13 horas), a excepción de los días de ensayo, en los cuales se cumplieron 6 horas diarias durante los 3 días de ensayo con horarios rotativos (de 6 a 12 horas, de 12 a 18 horas y de 16 a 22 horas). Se realizaron 3 ensayos cumpliendo las 200 horas de trabajo obligatorias de PPS para la carrera de Ingeniería Química.

#### 2.4. *Organigrama*

A continuación, en la Figura 1 podrá visualizarse la estructura organizativa de la empresa.

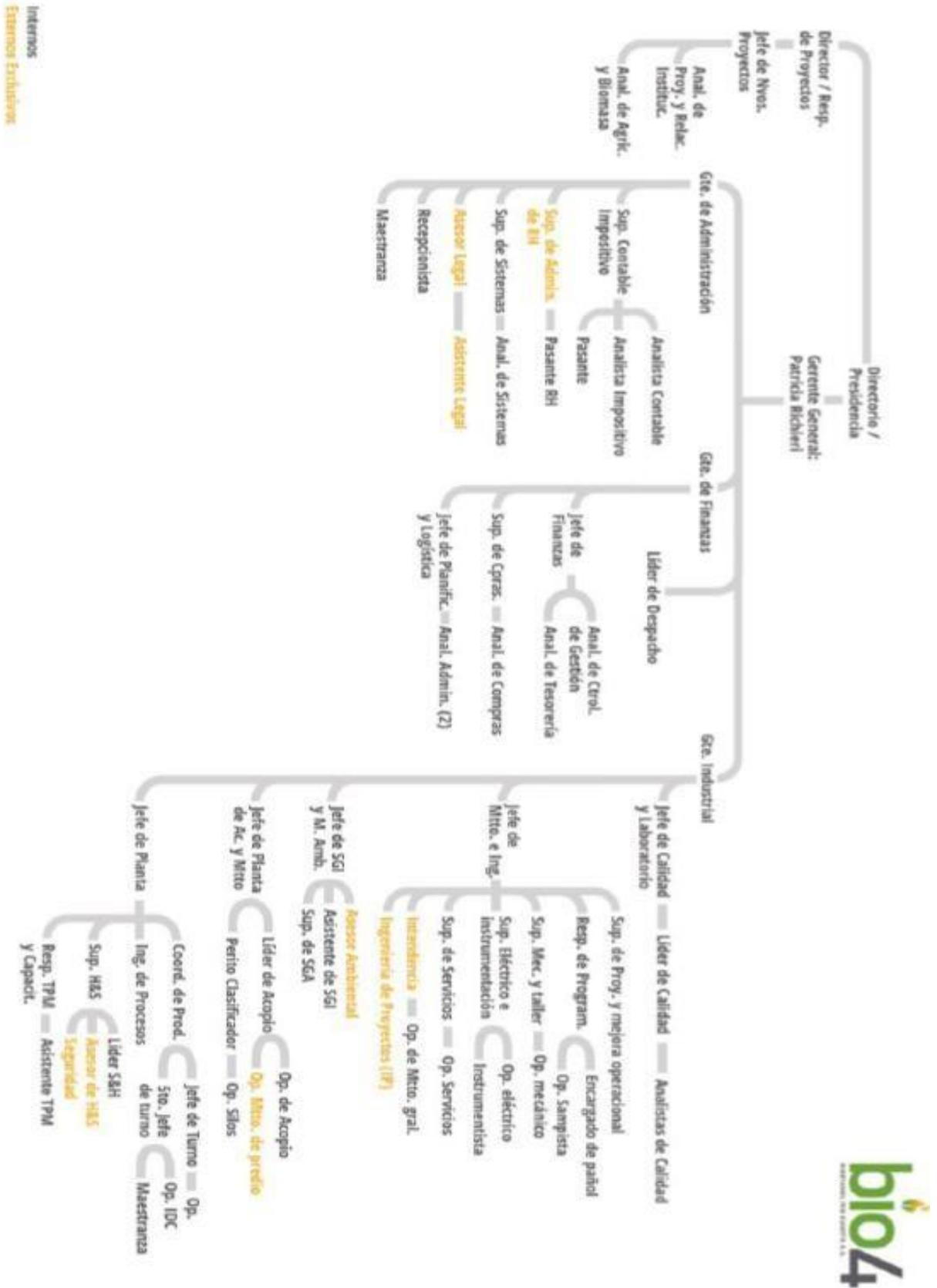
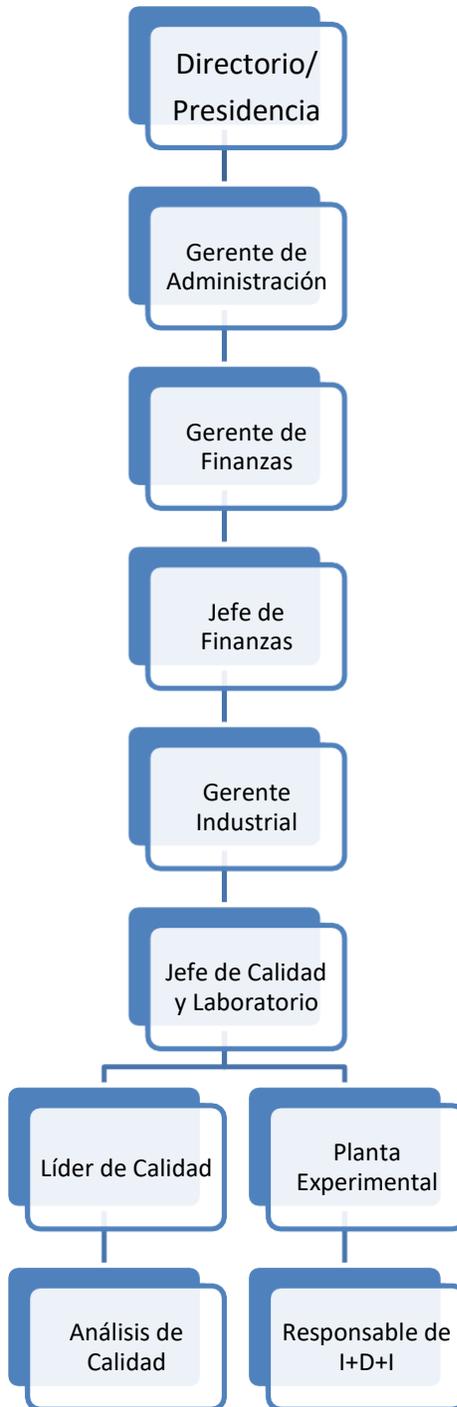


Figura 1: Organigrama de la empresa Bioetanol Río Cuarto S.A.

Las prácticas se realizaron en Planta Experimental, la cual se encuentra en relación de dependencia del área de calidad de la empresa. En la Figura 2 se observa su estructura.



*Figura 2: Organigrama de la Planta Experimental.*

## 2.5. Tecnología y Procesos

La producción de bioetanol, consiste en preparar el almidón contenido en los materiales crudos para la fermentación. Esto se logra mediante la adición de levaduras, que es un microorganismo capaz de convertir el azúcar en alcohol. El bioetanol es luego separado, concentrado y purificado.

Se puede destacar que el proceso a escala piloto tiene diferencias con respecto al de escala industrial, Bio4. Por un lado, en la escala piloto el destilador se encuentra dañado y en reparación, por lo que una vez producido el etanol, el tratamiento del mosto se continúa en las instalaciones de la planta industrial, Bio4. Otra de las diferencias es que el propagado<sup>2</sup> no se realiza en Planta Experimental, sino que se prepara de la planta de producción, debido a inconvenientes operativos que éste genera, y luego se lo traslada a Planta Experimental para agregarlo al proceso. Con esto se asegura que el número de células vivas con la que se inicia la fermentación sea el adecuado.

### Etapas del Proceso Productivo:

- **Recepción y Limpieza:**

Antes de que la materia prima ingrese a la planta, se realiza un calado en los camiones para determinar, mediante un análisis físico-químico, la calidad del cereal. Si la materia prima cumple con las condiciones adecuadas, se la envía a una planta de limpieza, propiedad de uno de los socios accionistas. Una vez que el cereal tiene las condiciones de limpieza adecuadas, se lo almacena en bolsas de 25-30 kg aproximadamente y se las envía a la Planta Experimental para su posterior uso.

- **Molienda:**

El proceso de la molienda se utiliza para reducir el tamaño de los granos (malla de 2 mm), exponiendo el gránulo de almidón e incrementando los grados Brix en la licuefacción. La molienda debe ser suficientemente fina para ser hidrolizada por

---

<sup>2</sup> Propagado: levaduras propagadas.

la enzima alfa amilasa y permitir el hinchamiento y/o ablandamiento de los gránulos de almidón. Esto trae como ventaja un menor tiempo de cocción y facilita el transporte.

- Licuefacción:

En esta etapa se degrada la estructura del almidón para permitir su hidrólisis, por lo cual se forman las dextrinas (cadenas menores), y luego, por medio de la enzima alfa amilasa, las dextrinas se reducen a azúcares fermentables como la glucosa. El licuefactor debe contar con un nivel adecuado de agua caliente, y con el agitador en funcionamiento para evitar la aglomeración de los sólidos, éstos se agregan por intermedio de un sinfín al salir del proceso de molienda. Una vez que se encuentra cargado completamente, se debe mantener 4 horas a una temperatura de 85 °C. El calentamiento se realiza con un intercambiador de calor tipo espiral a contracorriente.

- Fermentación:

En esta parte del proceso, mediante la acción de las levaduras, se realiza la conversión de los azúcares fermentables a etanol, llevándose a cabo la sacarificación y fermentación en conjunto. El propagado, se produce en instalaciones de Bio4 y se agrega directamente al fermentador de la Planta Experimental.

El proceso consiste en enfriar el mosto de fin de licuefacción hasta unos 33 °C, mediante el intercambiador de calor tipo espiral, utilizando agua fría proveniente de la torre de enfriamiento. Se adiciona gluco-amilasa para obtener azúcares simples y urea como fuente nitrogenada para el desarrollo de las levaduras.

Debido a que la fermentación es un proceso exotérmico, durante las 60 o más horas que dure el proceso, es muy crítico el control de la temperatura. El enfriamiento consiste en hacer circular el agua fría proveniente de la torre de enfriamiento por la camisa del fermentador, manteniendo una temperatura de 32-33

°C. Si la temperatura en algún momento fuera más elevada, las levaduras morirían dejando de producir etanol. Si fuera necesario agregar más levadura al

proceso, es importante realizarlo antes de las 30 horas de fermentación, ya que luego el grado alcohólico será elevado y las nuevas levaduras se estresarán y morirán instantáneamente.

- Destilación:

Debido a que a que la camisa del destilador se encuentra dañada, esta parte no se realizó en la Planta Experimental. Se vierte el mosto de fin de fermentación en bines, para luego agregarlos en la planta industrial Bio4 y realizar la extracción del alcohol.

A continuación, en la Figura 3 se muestra el diagrama de bloques del proceso:



*Figura 3: Diagrama de bloques del proceso.*

La Planta Experimental Bio4 cuenta con equipamiento necesario para la producción de etanol, su función es realizar ensayos, ya sea en la línea de producción o mediante la prueba de nuevas materias primas de interés. La realización de estos ensayos es llevada a cabo modificando variables operativas del proceso para luego analizar las alteraciones obtenidas en cada caso.

Durante el período de realización de la práctica no se encontraba en funcionamiento el destilador de la Planta Experimental, por lo cual, una vez generado

el alcohol, finalizaba el proceso allí y era continuado en la Planta Industrial, ya que ésta contaba con su destilador en funcionamiento.

A continuación, se detallan los equipos de la Planta Experimental:

- Molino (MG 1701): equipo encargado de transformar el maíz entero en harina de maíz. Un sinfín (RT 1701) carga la tolva del molino (TA 1701), que se encuentra en la parte superior. El molino tritura el maíz y permite la salida de la harina a través de una malla de 2 mm. El maíz, ya molido se carga al tanque licuefactor (TQ 1701) a través de un sinfín más pequeño (RT 1702).
- Calentador Eléctrico (CL 1701): equipo que nos permite elevar la temperatura en el proceso. Tiene una capacidad para calentar 1,2 m<sup>3</sup> de agua. Cuenta con un tanque de expansión asociado de 0,1 m<sup>3</sup> de capacidad (TQ 1705), un medidor de temperatura, un medidor de nivel y dos termocuplas para ajustar la temperatura deseada.
- Torre de Enfriamiento (TE 1701): equipo que nos permite disminuir la temperatura del proceso. Recibe agua caliente de la camisa del tanque y/o del intercambiador de calor y disminuye su temperatura para luego volver a utilizarla cuando sea necesario. Es del tipo de tiro inducido.
- Tanque de Licuefacción (TQ 1701): equipo donde se mezclan las materias primas y se realiza la cocción del mosto. Tiene una capacidad máxima de 1,8 m<sup>3</sup>. Cuenta con un agitador mecánico (AG 1701), un controlador PLC (Controlador Lógico Programable) con un sensor de nivel y otro de temperatura. En la parte superior cuenta con una pequeña tolva para adicionar enzimas e insumos y un dosificador de ácido.
- Intercambiador de Calor (IC 1701): equipo de tipo espiral, encargado de calentar o enfriar el mosto mientras se encuentra en el licuefactor (TQ 1701) o en el fermentador (TQ 1702), dependiendo de cada caso. Tiene un funcionamiento a contracorriente y cuenta con un sensor de temperatura.

- Tanque de Fermentación (TQ 1702): equipo en el cual se produce la fermentación. Posee una estructura similar al Tanque de Licuefacción (TQ 1701), con la diferencia de una camisa de enfriamiento que lo recubre. También cuenta con una salida de CO<sub>2</sub> hacia el exterior de la Planta.

El listado de equipos presentes en la Planta Experimental y los instrumentos de laboratorio utilizados se adjuntan en el Anexo I.

### 3. Descripción de las tareas realizadas

#### 3.1. Actividades Realizadas

##### 3.1.1. Reconocimiento de las instalaciones

Al comienzo de la PPS se realizó un recorrido por la planta industrial con el fin de conocer el proceso productivo. Se observó en las diferentes etapas del proceso, sus respectivos equipos en funcionamiento.

Luego, se realizó un reconocimiento de la Planta Experimental, sector de trabajo de la práctica profesional.

##### 3.1.2. Estudio de las normas que alcanzan el sistema de producción

Bio4 llevó a cabo diferentes capacitaciones necesarias para un correcto desempeño en la industria:

- Capacitación en Higiene y Seguridad: el primer día, lo primero que se realizó es la capacitación a cargo del responsable de Higiene y Seguridad, quién dio a conocer los elementos de protección personal (EPP) necesarios para permanecer en la planta, los cuidados que se deben tener para trabajar en las diferentes áreas y la matriz de riesgos, en la cual se mostró el riesgo asociado a cada tarea y su respectivo grado de peligrosidad.

- Capacitación sobre el Sistema de Gestión Integrado (SGI): Se mostró diferentes tipos de documentos que existen dentro de la empresa, la forma de crearlos y modificarlos cuando sea necesario. Se discutieron aspectos vinculados al medio ambiente, a la disposición final de residuos y las medidas tomadas para reducir el impacto ambiental.

- Capacitación en el laboratorio: Se mostró el equipamiento utilizado, con sus respectivas instrucciones de uso. Medidor de pH, FOSS, Termobalanza, NIR, Zonytest, entre otros, son los equipos utilizados para analizar los diferentes ensayos. En el Anexo I se encuentra el listado de equipos de laboratorio utilizados.

### 3.1.3. Estudio del proceso de producción

La Planta Experimental cuenta con diferentes instructivos operativos, con el fin de comprender el proceso de producción en detalle. En el Anexo II se encuentra un ejemplo.

### 3.1.4. Modificación de instructivos operativos

La empresa cuenta con instructivos operativos (IO), que describen muy detalladamente todos los procesos que se llevan a cabo en la planta. Éstos instructivos van sufriendo modificaciones a medida que la planta tiene algún cambio, ya sea de producción o referido al equipamiento. Se realizaron modificaciones en “Arranque y parada en Molienda, Licuefacción y Fermentación”, debido a que se encontraron errores en nomenclatura de válvulas, tiempos de vaciado demasiado largos, entre otras cosas. En el Anexo II se muestra un ejemplo.

### 3.1.5. Ensayos de fermentación con maíz e incorporación de digestato

Se llevó a cabo ensayos de fermentación a escala piloto, en los cuales se utilizó digestato<sup>3</sup>, en el que se reemplazó aproximadamente un 25% del agua requerida por el proceso. La finalidad fue analizar el rendimiento y compararlo con ensayos anteriores realizados por otros pasantes. Se realizó un seguimiento del proceso, tomando diferentes muestras y registrando los datos necesarios.

### 3.1.6. Otras actividades realizadas

Además de las actividades que se detallaron anteriormente, el pasante realizó

---

<sup>3</sup> Digestato: efluente de planta de biogás.

el cálculo teórico de pérdida de carga de la cañería que contiene agua de alimentación, ejecutó cambios y actualizaciones en los instructivos del proceso y los respectivos equipos. Por último, como otra actividad de la PPS puede mencionarse la tarea de calcular el volumen teórico y empírico de los tanques de licuefacción y fermentación.

### 3.2. Resultados y análisis

Se realizó el análisis de siete ensayos, de los cuales seis se realizaron con maíz y adición de digestato, y el ensayo restante en ausencia de digestato (Ensayo 6). El pasante realizó los ensayos 5, 6 y 7; los ensayos 1, 2, 3 y 4 fueron realizados por otros pasantes anteriormente. Se tomó los datos que se consideraron importantes y se analizó cada variable en relación al rendimiento del proceso.

#### 3.2.1 Materia prima

Se tomó muestras de maíz entero y se analizó su composición a través del FOSS<sup>4</sup>. Las características permanecen prácticamente constantes por lo que se utilizó un promedio de los siete ensayos que se tuvieron en cuenta.

En la Tabla 1 se observan los valores promedio.

*Tabla 1: Composición del grano de maíz entero*

% Humedad	13,45
% Grasas T/C <sup>5</sup>	4,35
Almidón BS	72,15
Proteína BS	7,52

#### 3.2.2. Molienda

<sup>4</sup> FOSS: equipo que se carga con una muestra de maíz, de aproximadamente 400 gramos, y realiza los análisis correspondientes de porcentaje de humedad, porcentaje de grasas T/C, almidón BS y proteína BS.

<sup>5</sup> Grasas T/C: son las grasas que contiene el grano, considerando su humedad.

Una vez que el maíz es procesado en el molino de martillos, se tomó una muestra y se analizó su distribución de partículas utilizando el equipo Zonytest<sup>6</sup>. Se tomaron nuevamente los siete ensayos y se analizó la dispersión de las partículas en cada muestra, que se observa a continuación en la Figura 4.

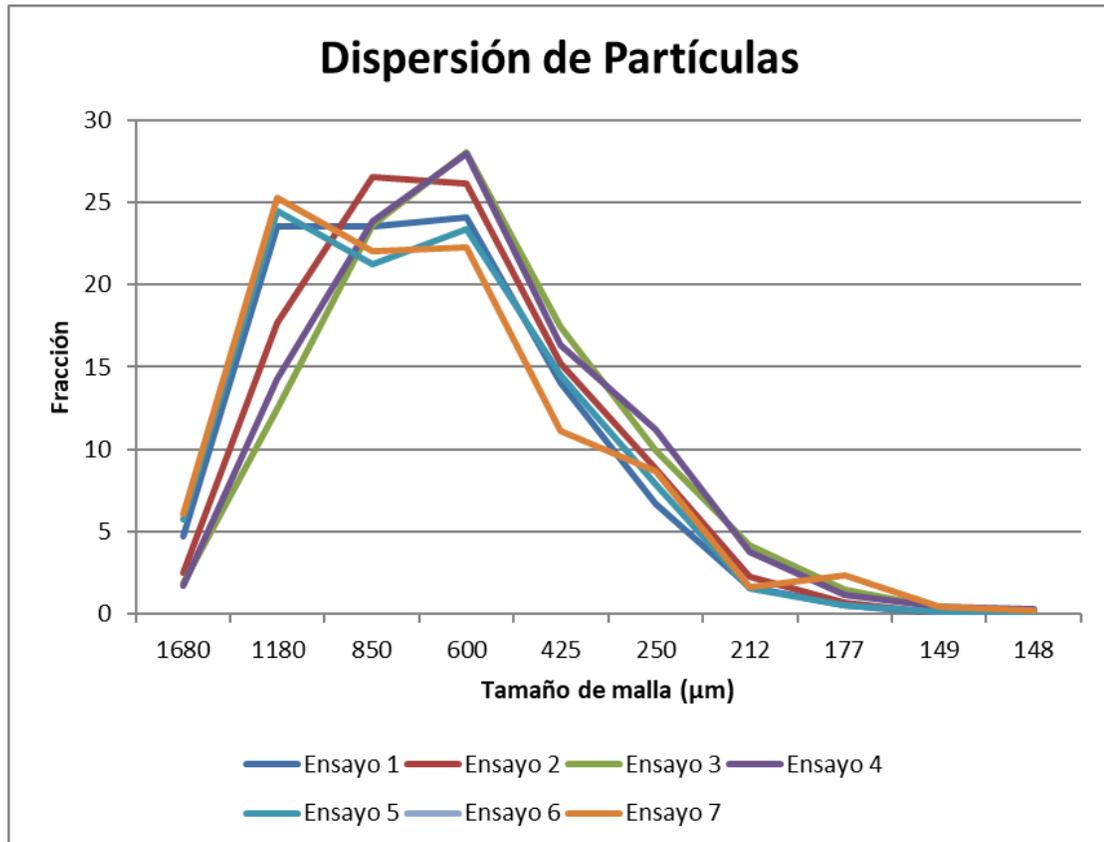


Figura 4: Dispersión de partículas de maíz molido.

Puede observarse que la dispersión de partículas no cambia de manera significativa en los diferentes ensayos.

### 3.2.3. Licuefacción

Dentro de la etapa de licuefacción, se toman los datos que se consideran más relevantes y se comparan en los diferentes ensayos.

<sup>6</sup> Zonytest: equipo vibrador compuesto de tamices de diferentes tamaños que permite realizar un análisis granulométrico de una muestra de maíz molido.

- **Temperatura:** En esta etapa, la temperatura debe encontrarse en 85 °C. En la Figura 5 se observa la variación de la temperatura en función del tiempo de licuefacción. En el caso de utilizar digestato, previo a la licuefacción se hace un tratamiento térmico a una temperatura de 90 °C durante 2 horas.

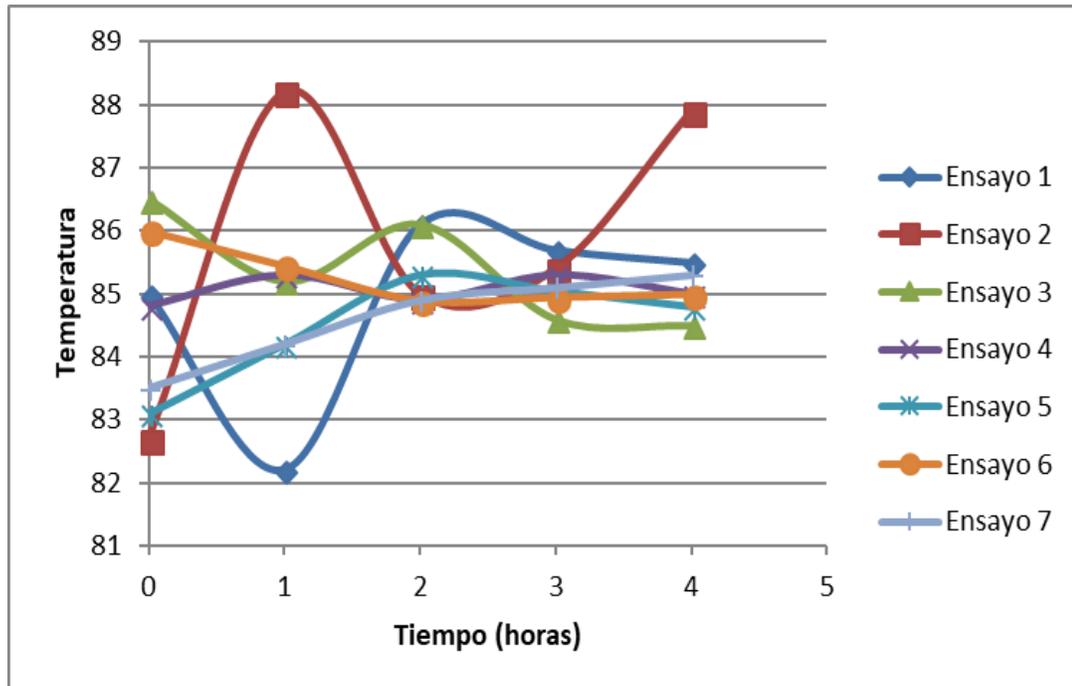


Figura 5: Variación de la temperatura durante la licuefacción en los diferentes ensayos.

En el caso de la variación de la temperatura durante el proceso de licuefacción se observó que el Ensayo 2 presenta picos de temperatura muy elevados y el Ensayo 1 tiene un pico muy bajo. El resto de los ensayos tiene una temperatura relativamente constante y adecuada, es decir, entre 84-86 °C.

- **pH:** el valor recomendado es entre 5,1-5,3. En la Figura 6 se observa la variación del pH en función del tiempo de licuefacción. Para disminuir el pH se utiliza ácido sulfúrico, y en el caso que sea necesario subirlo se utiliza soda cáustica.

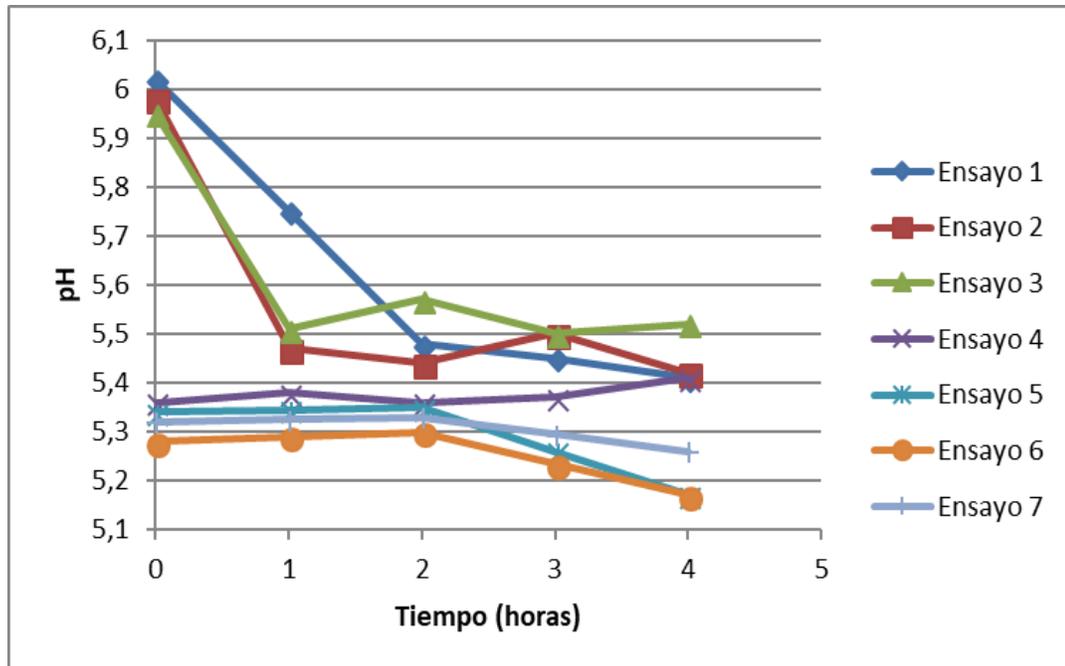


Figura 6: Variación del pH durante la licuefacción en los diferentes ensayos.

Puede observarse que en los Ensayos 1, 2 y 3, el valor inicial de pH es elevado, y que luego disminuye hasta el valor deseado. Esto se debe a que primero se adicionó la enzima alfa-amilasa y luego se fue corrigiendo el pH de manera gradual mediante adición de ácido sulfúrico. En cambio, en el resto de los ensayos, se corrigió el pH antes de iniciar la licuefacción y luego se adicionó la enzima alfa-amilasa.

- Porcentaje de sólidos totales: A través de una termobalanza se determina el porcentaje de sólidos totales al inicio de la licuefacción. El porcentaje recomendado es 32-33 % p/p. En la Figura 7 se observa el porcentaje de sólidos totales de cada ensayo analizado.

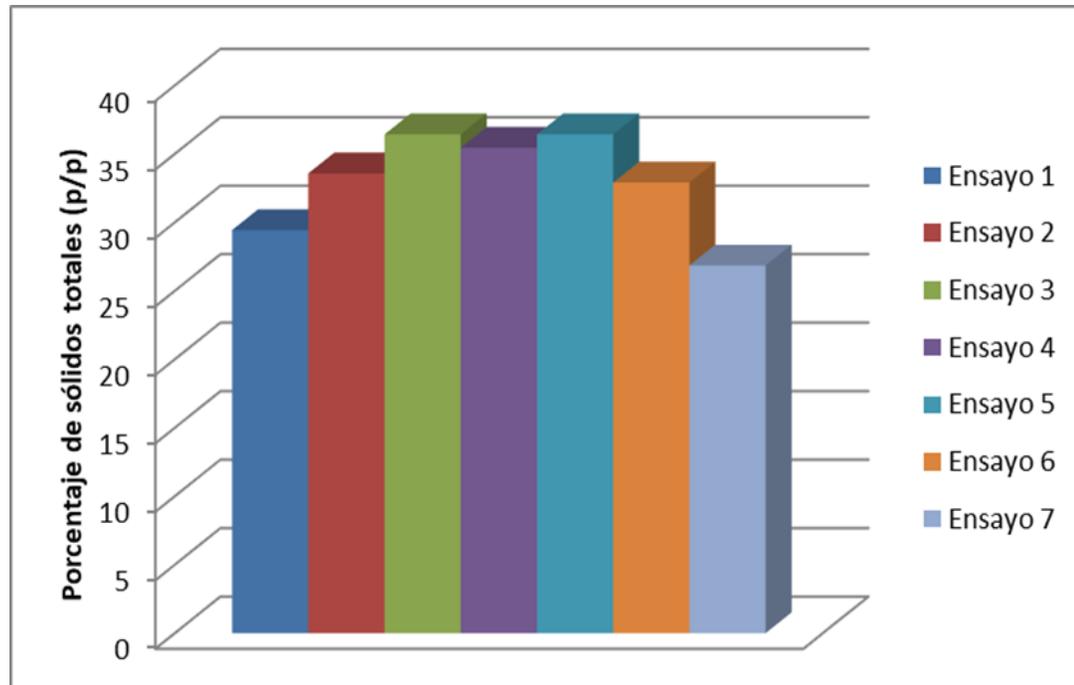


Figura 7: Porcentaje de sólidos totales al inicio de la licuefacción.

En el gráfico se observa que el porcentaje de sólidos al inicio de la licuefacción es muy bajo para el Ensayo 7. Esto se debe a que se cometió un error cuando se realizó el cálculo teórico de los mismos y por lo tanto se agregó una menor cantidad de maíz de la necesaria.

Las variaciones en los demás ensayos son debidas a errores experimentales en la medición de masa del maíz o del volumen de agua de proceso.

#### 3.2.4. Fermentación

Se consideran los datos más relevantes de fermentación y se grafican a modo comparativo.

- Porcentaje de sólidos totales iniciales: éste dato es necesario para luego poder calcular la eficiencia. Indica la cantidad de sólidos fermentables que se encuentran disponibles. En la Figura 8 se observa el porcentaje de sólidos totales para cada ensayo analizado.

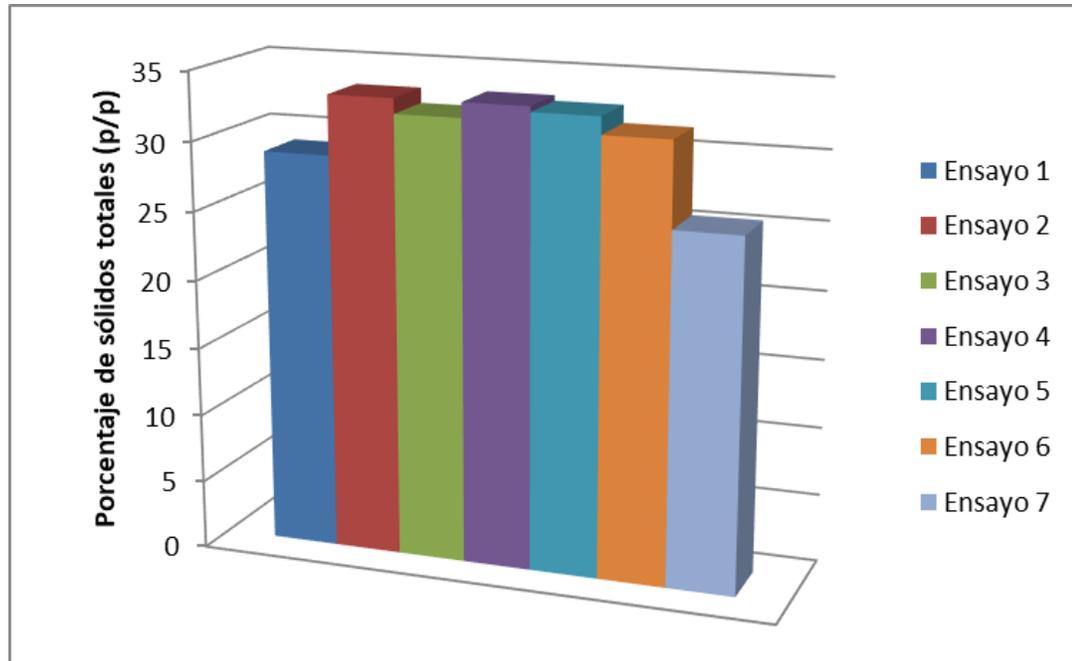


Figura 8: Porcentaje de sólidos totales al inicio de la fermentación.

En este caso, al igual que en la Figura 7, para el caso del Ensayo 7, se cometió un error al calcular los sólidos necesarios y por este motivo son menores a los necesarios para el proceso. Las variaciones en el resto de los ensayos se deben a errores experimentales.

- Temperatura: el adecuado control de la temperatura es un factor importante en cuanto a la eficiencia del proceso, así como también a la calidad de vida de las levaduras debido a la sensibilidad que éstas poseen. El rango adecuado es entre 32-33 °C para el tipo de levadura que se utiliza. En la Figura 9 se muestra el seguimiento de temperatura para cada ensayo analizado.

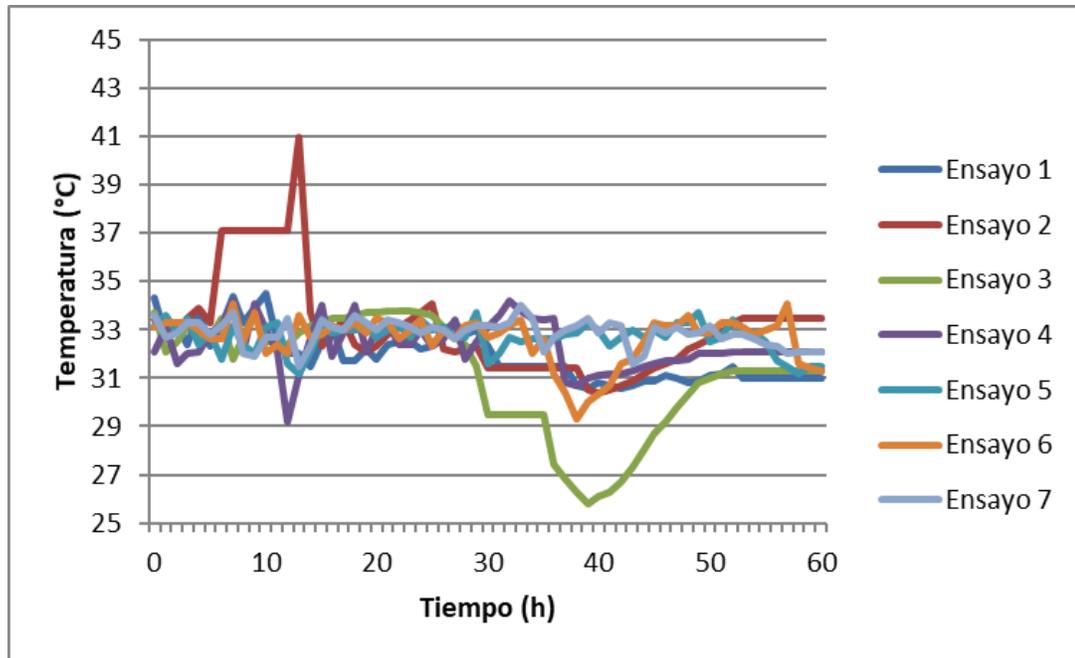


Figura 9: Variación de la temperatura de los diferentes ensayos durante la fermentación.

En el gráfico anterior se observa un pico elevado de temperatura para el Ensayo 2, debido a un mal control. Esto genera serios problemas, ya que las levaduras mueren, generando problemas en el rendimiento del proceso como se mostrará posteriormente. En cambio, en el Ensayo 3 hay un pico de baja temperatura, siendo esto no tan drástico como el Ensayo 2.

- Grado alcohólico (° GL): Se realiza un seguimiento del grado de alcohol durante la fermentación con un equipo de infrarrojo cercano (NIR). En la Figura 10 se muestra el aumento del ° GL para cada ensayo en función del tiempo.

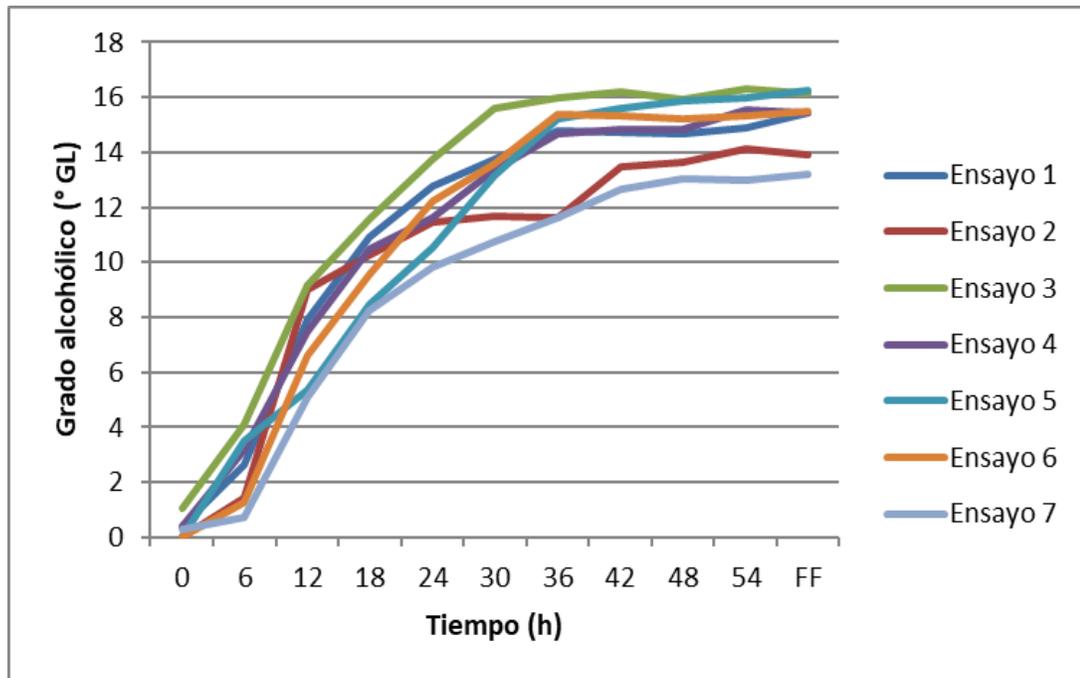
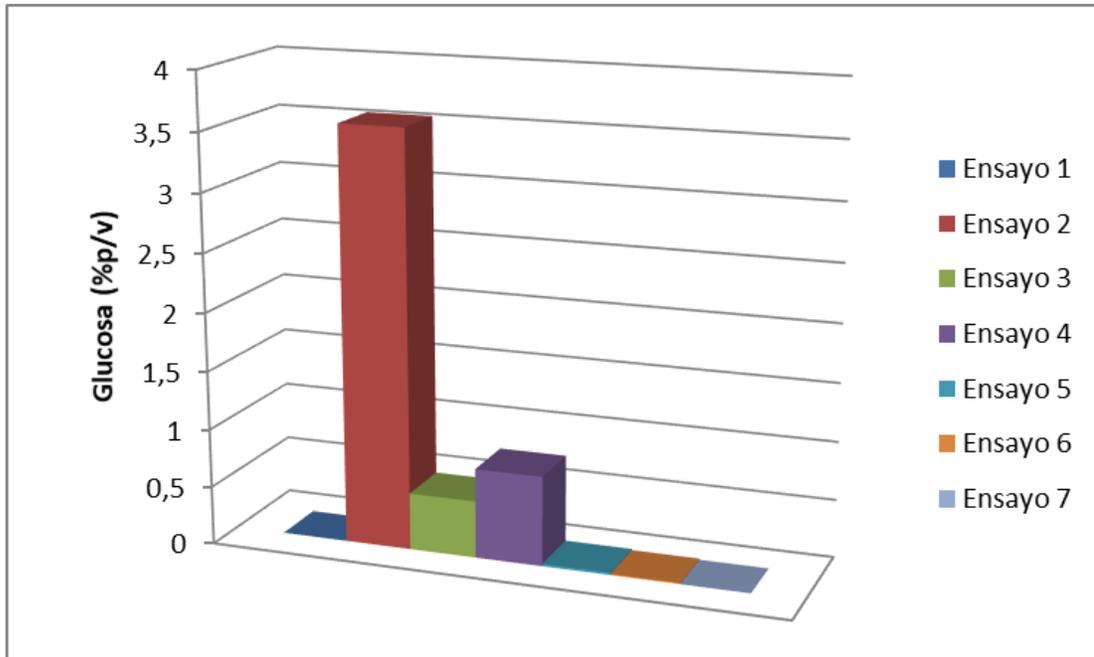


Figura 10: Evolución del grado alcohólico durante la fermentación.

La producción de etanol llega a un valor entre 14-16 % p/v, esto se debe a que las levaduras sufren estrés y mueren, provocando el fin de fermentación al llegar a estos niveles de concentración. En el gráfico anterior puede verse que el agregado de digestato no afecta a la producción de etanol.

En el Ensayo 7 puede observarse que el ° GL alcanzado es menor, debido a la menor cantidad de sólidos que contenía el ensayo.

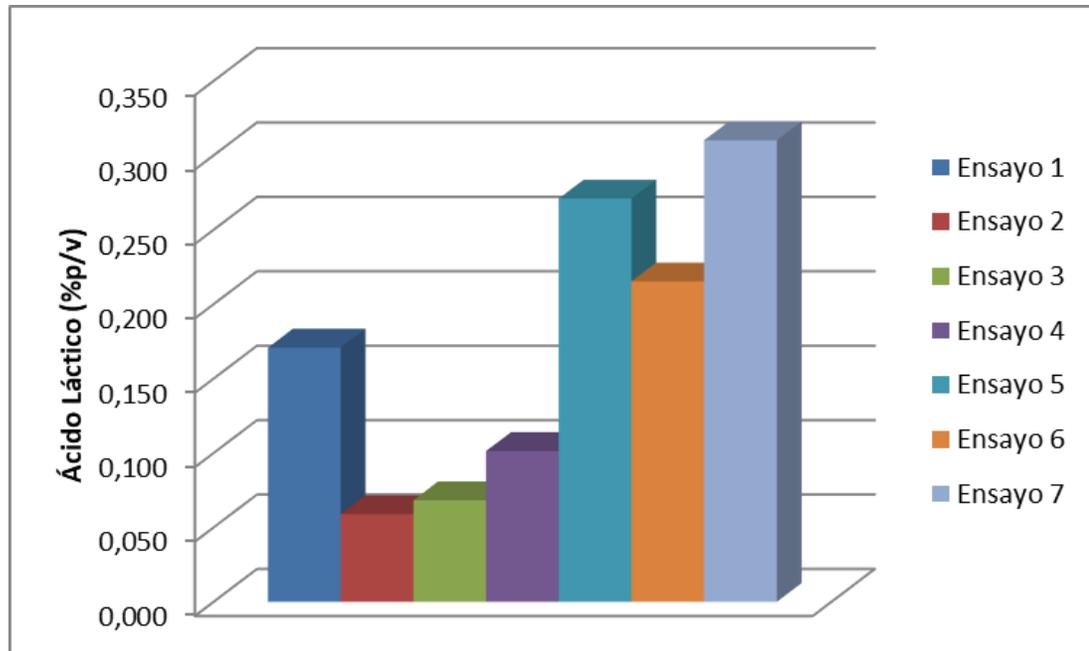
- Glucosa (%p/v): Al finalizar la fermentación, la cantidad de glucosa que se encuentra en el medio es un indicador del grado de fermentación que se alcanza. A menor cantidad de glucosa, mejor fue la fermentación. En la Figura 11 se muestra la glucosa presente al final de cada ensayo.



*Figura 11: Concentración de glucosa en el final de cada ensayo.*

Se observa, que a excepción del ensayo 2, los demás tienen valores menores al 1% de glucosa, que es el máximo valor permitido para una fermentación adecuada según los valores de referencia de Bio4. La elevada concentración de glucosa de este ensayo indica que por algún motivo la fermentación ha sido deficiente.

- **Ácido Láctico (%p/v):** La presencia de ácido láctico indica contaminación con bacterias. Éstas consumen glucosa disponible, produciendo ácido láctico y afectando al rendimiento del proceso. En la Figura 12 se muestra la concentración de ácido láctico para cada ensayo al final de la fermentación.



*Figura 12: Concentración de ácido láctico en el final de cada ensayo.*

A partir del gráfico antes mostrado se puede observar que la concentración de ácido láctico es menor al 0,5%, que es el valor de referencia máximo admitido en Bio4. Con esto se puede concluir que la contaminación bacteriana está en el rango de trabajo.

### 3.2.5. Microbiología

Se realizó un recuento de aerobios totales (RAT) en diferentes momentos del proceso para evaluar el tratamiento térmico empleado. Para este caso se tomaron los seis ensayos en los que se trabaja con digestato. En la Figura 13 se muestra el recuento para el digestato empleado, mostrando las unidades formadoras de colonia por mililitro - UFC/ml – para cada ensayo analizado.

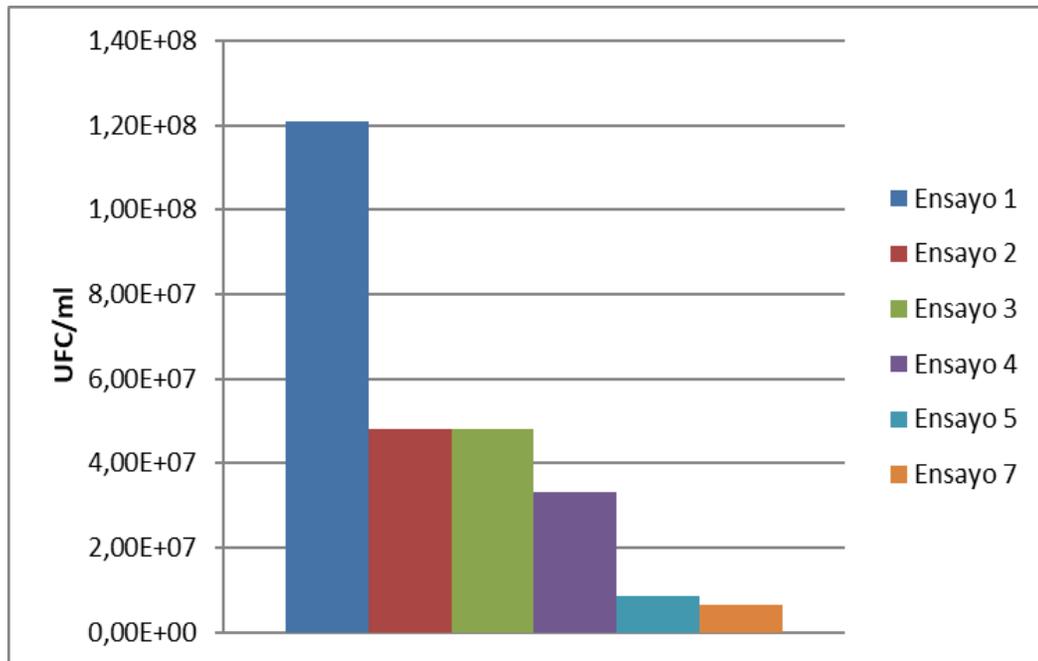


Figura 13: RAT del digestato para cada ensayo.

En la Figura 14 se muestra el recuento de aerobios totales (RAT) luego de realizar un tratamiento térmico a 90°C durante 2 horas.

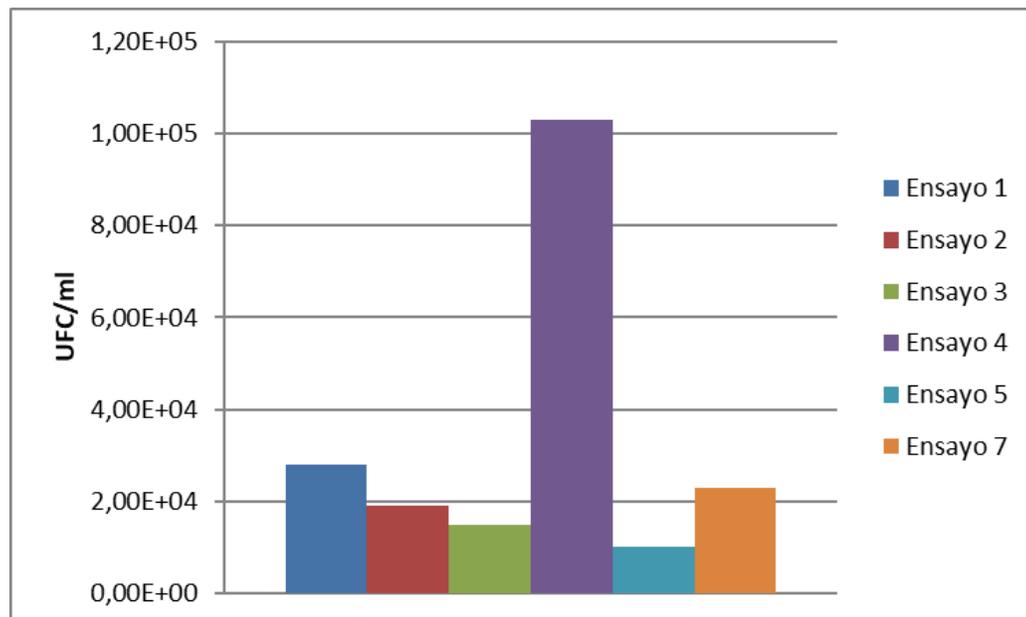
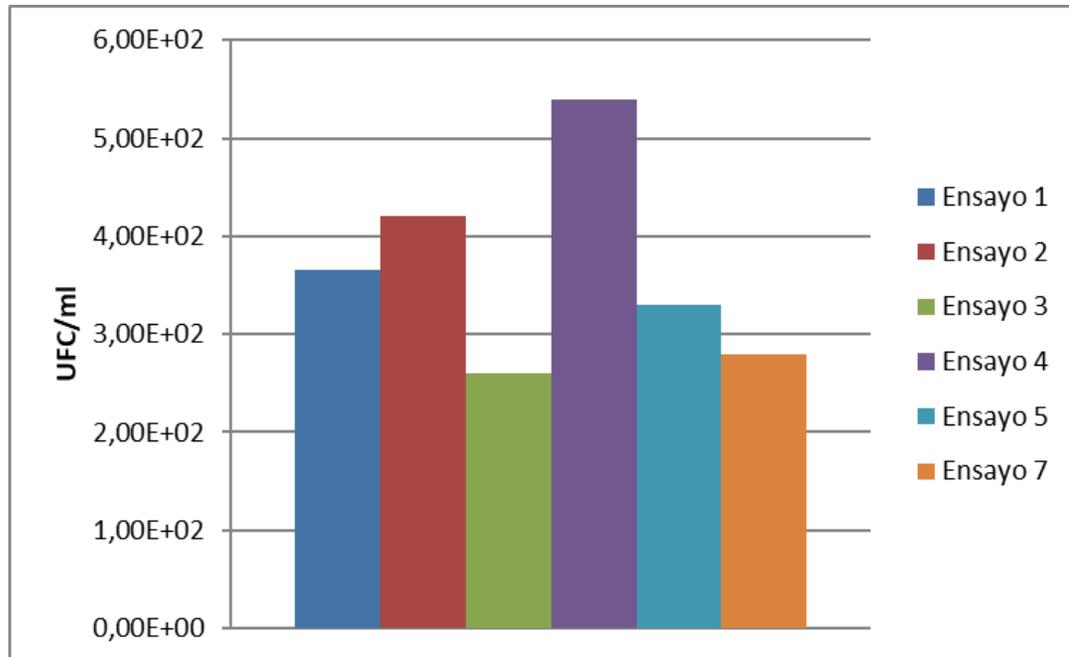


Figura 14: RAT al finalizar el tratamiento térmico a 90 °C durante 2 horas.

Para finalizar, se muestra en la Figura 15 el recuento de aerobios totales (RAT) para el mosto al final de la licuefacción, en el cual se trabaja a una temperatura de 85 °C aproximadamente durante 4 horas.



*Figura 15: RAT al finalizar las 4 horas de licuefacción.*

A partir de los gráficos mostrados en las Figuras 13, 14 y 15, se puede observar que la carga microbiana se reduce en 4 órdenes de magnitud, por lo que se considera eficiente el tratamiento térmico que se realiza.

### 3.2.6. Determinación de la eficiencia

Para determinar la eficiencia del proceso, se tienen en cuenta los ° GL reales y los ° GL teóricos, que se muestran a continuación en la Figura 16 para cada ensayo. En el Anexo III se muestran las ecuaciones utilizadas y la forma de cálculo para los ° GL teóricos.

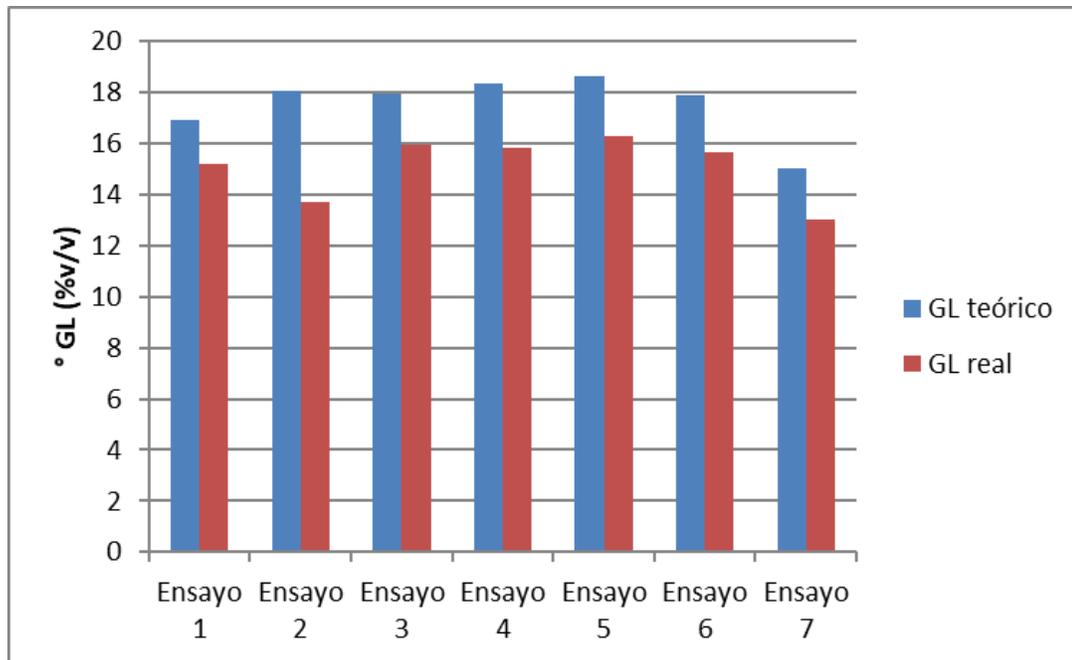


Figura 16: Comparación de los °GL reales y teóricos para cada ensayo.

A partir del grado de alcohol teórico y real, para cada ensayo se obtiene la eficiencia de cada uno, que se muestra a continuación en la Figura 17. En el Anexo III se muestra la forma en que se calcula la eficiencia.

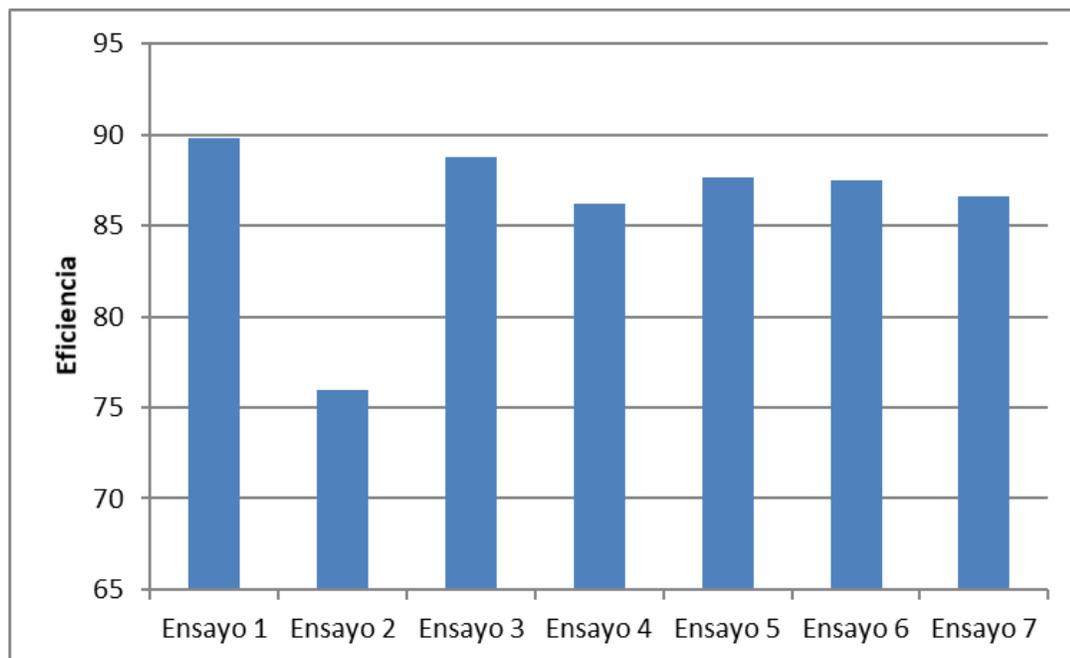


Figura 17: Eficiencia para cada ensayo.

Analizando el gráfico anterior, se observa que la eficiencia es elevada, a excepción del ensayo 2, donde hubo problemas con el control de la temperatura.

Se observa que el agregado de digestato no afecta al proceso de generación de etanol a partir de maíz.

## 4. Conclusión

Para poder concluir acerca del impacto generado por la incorporación de digestato, con el correcto tratamiento térmico previo, al proceso fermentativo fue necesario previamente comprender el proceso en planta principal, reconocer sus áreas, instalaciones, tecnologías y la normativa utilizada, para luego realizar el mismo procedimiento, a escala piloto. En la Planta Experimental, se realizaron las tareas de manera correcta y ejecutando los controles de parámetros críticos permitió arribar a los resultados predeterminados. Al incorporar digestato, en reemplazo del agua de proceso en un 25%, es evidente concluir que dicha incorporación no provoca efectos contradictorios a los esperados en la eficiencia del proceso fermentativo.

Durante el período en el que fue llevada a cabo la PPS ha sido posible cumplir con la totalidad de objetivos planteados, generando para ello trabajo en equipo, o realizándolo por cuenta del pasante en las ocasiones que fue necesario, incrementando así la confianza propia y la determinación a la hora de tomar decisiones. En oportunidades ha sido indispensable la utilización de los vínculos generados con los especialistas del área Laboratorio, Mantenimiento y/o Anhidración, como así también con la tutora a cargo y el resto de los pasantes, creándose un clima agradable de trabajo.

La realización de la PPS, ha sido una experiencia enriquecedora para el pasante, ya que se pudieron poner en práctica los conocimientos teóricos adquiridos en el cursado de la carrera de Ingeniería Química, aplicando éstos a las situaciones presentadas durante los ensayos realizados.

## 5. Bibliografía

- Material de cátedra de Operaciones Unitarias I de la Universidad Nacional de Río Cuarto (año 2016).
- Manuales Operativos e Instructivos Operativos de Bioetanol Río Cuarto S.A., vigentes en enero-marzo 2018.
- Bioetanol Río Cuarto S.A. <http://www.bio4.com.ar/>. Revisado por última vez en marzo de 2018.

## 6. Anexos

*Anexo I: Listado de equipos y características:*

Tabla AI.1: Equipos que se encuentran en la Planta Experimental y que fueron utilizados durante el período de la PPS.

Equipo	Nomenclatura	Características
Tornillo sinfín	RT 1701	Paso de espira: 245 mm. Dimensiones de tolva: 440 x 355 mm.
Tolva de almacenamiento	TA 1701	Boca inferior con clapeta. Escalera lateral de acceso.
Tornillo sinfín	RT 1702	Paso de espira: 75 mm. Dimensiones de tolva: 450 x 250 mm.
Tanque pre-mezcla y licuefacción	TQ 1701	Volumen útil: 1800 l. Dimensiones del volumen: Diámetro: 1,2 m; Altura: 1,5 m; Altura de codo de fondo: 0,38 m; Sin camisa y con sistema de agitación incluido. Dosificador de enzimas de 12 l con válvula de aguja.
Tanque fermentador	TQ 1702	Volumen útil: 1800 l. Dimensiones del volumen: Diámetro: 1,2 m; Altura: 1,5 m; Altura de codo de fondo: 0,38 m; Con camisa para enfriamiento con agua y con sistema de agitación incluido. Dosificador de enzimas de 12 l con válvula de aguja.
Agitadores de tanque	AG 1701/02	Conformado por dos hélices con palas

fermentador y licuefactor		<p>inclinadas, a 45°; diámetro del eje: 35 mm.</p> <p>Reductor STM Modelo: AM 50/2;</p> <p>Motor eléctrico IP 55 WEG; manchón del reductor marca Tupac modelo 3MA.</p>
Bombas de tanque licuefactor y fermentador	BO 1701/02	<p>Bomba centrífuga. Motor eléctrico WEG trifásico 3HP IP 55 2900 RPM;</p> <p>Sello mecánico, monoresorte normalizado DIN 24960, de acero inoxidable con caras de cerámica/carbón; elastómeros de VITON; O'ring de EPDM; Totalmente realizada en acero inoxidable mediante mecano-soldadura. Construcción horizontal, Back Pull Out con impulsor abierto; Base de montaje construida totalmente en acero inoxidable calidad AISI 304; Asp. de 1" e Imp. de 3/4".</p>
Intercambiador de calor	IC 1701	<p>Intercambiador en espiral; área de transferencia: 4,2 m<sup>2</sup>.</p>
Calentador eléctrico	CL 1701	<p>Intercambio térmico: cabezales de bronce, con resistencias blindadas en acero inoxidable, potencia total: 126 KW, 380 V- 50 Hz.</p> <p>Aislación térmica: lana de vidrio de alta densidad, de 2" y cubierta exterior en chapa de aluminio KICSA, de 0,8 mm.</p> <p>Presión de trabajo: 3 Kg/Cm<sup>2</sup>. Presión de prueba: 5 Kg/Cm<sup>2</sup>. Sensores incorporados- Termostato operativo de 0°C a 120°C. Termostato de seguridad</p>

		a 0°C y 120°C. Termómetro, válvula de seguridad y válvula de purga. Hidrómetro. Presostato inversor (corte por falta de agua)
Torre de enfriamiento	TE 1701	Modelo EWK 144/09. TR (máx.): 60. Motor eléctrico trifásico de 2 HP, 920 rpm. Ventilador de 6 palas Noryl, con centro de aluminio Multi Wing mod. 1W, diámetro 912 mm.
Bomba para carga de digestato y propagado	BO 1705	-
Molino	MG 1701	Molino de martillos marca Loyto. Caudal de 2000 kg/h de maíz. Se acciona por medio de un motor trifásico de 5,5 HP, proporcionando una velocidad de 4200 rpm.

Tabla AI.2: Equipos utilizados en el laboratorio.

Equipo	Determinación	Características
Tamices vibratorios	Granulometría	*Tamiz para laboratorio, malla bajo Normas Mundiales ISO 3310-1 ASTM E-11 Rey y Ronzoni S.R.L. N° 12, 16, 20, 30, 40, 60, 70, 80 y 100. *Bolitas plásticas (4 por tamiz). *Balanza OHAUS PA 3102 con precisión de 2 decimales. *Equipo vibrador digital LR 2006.

		Vibrador standard "Zonytest" EJR 200-210-220.
Termobalanza	Porcentaje de sólidos totales	*Balanza de humedad OHAUS. *Platillo de aluminio para muestra.
pH-metro	pH	*pH-metro. HI 9126 Hanna instruments. *Soporte del pH-metro y solución de limpieza HI70300S. *Electrodo pH Hi 1230. *Electrodo temperatura Hi 1131B.
NIR Perten DA7200	*En maíz entero: %humedad, almidón, proteínas y lípidos. *En mosto: Concentración de glucosa, etanol y porcentaje de sólidos totales.	*Requisitos de alimentación: 115/230 V, 50/60 Hz, 115W. *Dimensiones: (H*D*W): 556*375*370 mm. *Peso neto: 21 kg. *Productos: granos, pellets, líquidos, pastas, polvos, etc.
Foss	Humedad porcentual, almidón, proteínas y grasas	*Se utiliza una muestra de 400 g de maíz

*Anexo II: Ejemplo de Instructivo Operativo:*

	Molienda	Página 1 de 6
		MO PE 01.Rev. 00
		Fecha Bab:13/01/17

	ELABORA/MODIFICA	CONTROLA	APRUEBA
Nº Revisión	Función	Función	Función
<b>0</b>	Coordinación SGI	Responsable de Planta experimental	

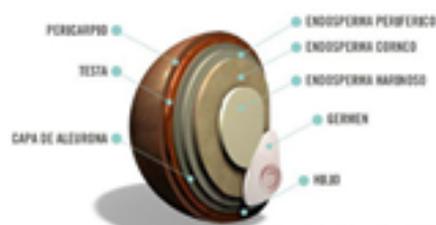
NOTA: El presente documento es propiedad de Bioetanol Río Cuarto SA y está prohibida la reproducción parcial y/o total de la información sin un acuerdo por escrito.

1. **OBJETIVO:** Exponer los conceptos generales de la etapa de Molienda.
2. **ALCANCE:** Todo el personal involucrado en las tareas de la etapa de Molienda de la Planta Experimental.
3. **DEFINICIONES Y SIGLAS:**
  - PCC (Puntos Críticos de Control): Se trata de parámetros o variables estandarizadas, cuyo desvío puede ocasionar un efecto no deseado en la continuidad del proceso del que se trate, pudiendo o no afectar la calidad del producto final. La determinación de los puntos críticos de Control es responsabilidad de los Jefes respectivos, aceptándose que pueden variar frente a la presentación de distintas circunstancias internas o externas al proceso de que se trate. Los mismos se encuentran detallados en las EP.
  - PC (Puntos de Control): parámetros que el Operario debe tener en cuenta para mantener los PCC dentro de los valores adecuados.
  - D.D.G.S.: Granos secos de destilería con solubles.
  - F.C.H.: fibra cruda más hemicelulosas.
4. **DOCUMENTACION DE REFERENCIA:**
5. **DESARROLLO:**
  - 5.1. Introducción

La primera etapa para la producción de bioetanol es la de molienda de la materia prima. En la planta experimental de Bio4 la materia prima a utilizar es el sorgo. La recepción es una etapa previa a la molienda, y es un factor fundamental para evitar complicaciones en el proceso. El bioetanol se produce mediante la utilización del almidón de los granos de sorgo.
  - 5.2. Recepción del cereal

La recepción del cereal se realiza previo muestreo mediante un calado realizado manualmente. Dichas muestras son analizadas fisicoquímicamente. Si el sorgo no es apto para el proceso, se devolverá al proveedor.

	Molienda	Página 2 de 6
		MUPEUT.Rev.00
		Fecha Elab:13/01/17



Coriza del grano de Sorgo (Adaptado de Wernika, 2000)

Figura 1: Partes del grano de sorgo

Fuente: <http://bmeditores.mx/materias-primas-y-aditivos-para-la-formulacion-de-concentrados-en-ganado-de-carne/>

Tabla 1: Composición del grano de sorgo

Humedad	14,85%
Almidón	63,60%
Materia grasa	2,55%
Proteína bruta	7,45%
Taninos	1,90%

### 5.3. Sección balanza y silos de almacenamiento

El sorgo a procesar se pesará en una balanza de pie apta para bolsas de 25kg. Se opera aplicando el sistema de molienda seca a partir de sorgo. El sorgo es recibido a granel, pesado, descargado y almacenado en bolsas, previo muestreo y análisis a efectos de evaluar su calidad.

Inicialmente se evalúa la presencia de mohos y la apariencia general del grano que es complementado con otros análisis y/o determinaciones específicas, tales como: peso hectolitro, y composición porcentual que es determinada mediante aplicación de técnicas espectroscópicas basadas en el infrarrojo cercano. Las determinaciones a realizar en éste equipo son % p/p de: humedad, almidón, proteínas y materia grasa, las que son comparadas de manera regular con las mismas determinaciones que, en paralelo, se realizan en el laboratorio vía química húmeda.

Se deben eliminar también, en caso de que los hubiera, restos metálicos y demás cuerpos extraños que afecten la producción y/o dañen el molino.

### 5.4. Sección molienda

El objetivo de la molienda es reducir el tamaño de los granos, de esta manera se expone el gránulo de almidón y se incrementa los grados Brix en la licuefacción, así se incrementa la producción de alcohol y se reduce el almidón **en el DDGS**.

El sorgo limpio, se muele como harina de sorgo, que debe ser lo suficientemente fina (diámetro de partícula=1mm) para ser **licuado** por la enzima correspondiente y también para permitir el hinchamiento y ablandamiento de los gránulos de almidón, lo cual reduce el tiempo de cocción y facilita el transporte de material.

*Anexo III: Cálculo de rendimiento:*

El rendimiento del proceso fermentativo está definido a partir de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{^{\circ}GL_{real}}{^{\circ}GL_{teórico}}$$

Donde el ° GL real es el rendimiento obtenido para cada uno de los ensayos realizados, y el ° GL teórico se calcula de la siguiente manera:

$$^{\circ}GL_{teórico} = \frac{Vol_{ferm} * \frac{\%ST_{ferm}}{100} * \frac{A_{bs_{ferm}}}{100} * \gamma * \beta * \rho_{mosto}}{Vol_{ferm} * \delta} \rho_{etanol}$$

Dónde:

$Vol_{ferm}$  = Volumen del fermentador en hora 0 de fermentación (m<sup>3</sup>).

$\% ST_{ferm}$  = Porcentaje de sólidos totales corregido en HS 0 de fermentación (gsólido/gmosto).

$A_{bs_{ferm}}$  = Almidón base seca en HS 0 de fermentación (galmidón/gsólidoseco).

$\gamma$  = Hidrólisis del almidón a glucosa (gglucosa/galmidón).

$\beta$  = Conversión de glucosa a etanol (getanol/gglucosa).

$\rho_{mosto}$  = Densidad del mosto (kg/m<sup>3</sup>).

$\rho_{etanol}$  = Densidad del etanol (kg/m<sup>3</sup>).

$\delta$  = Conversión a dióxido de carbono.

