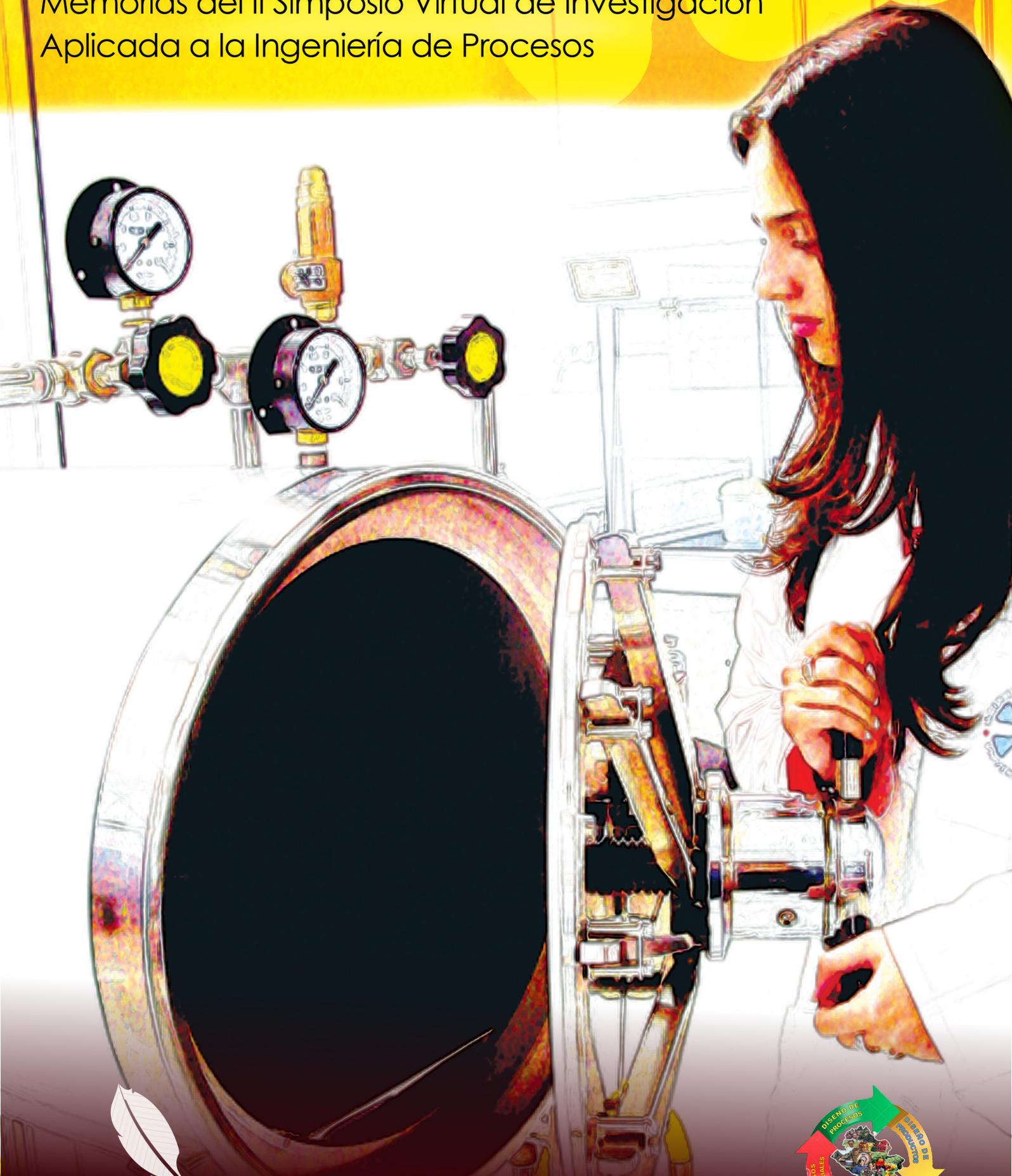
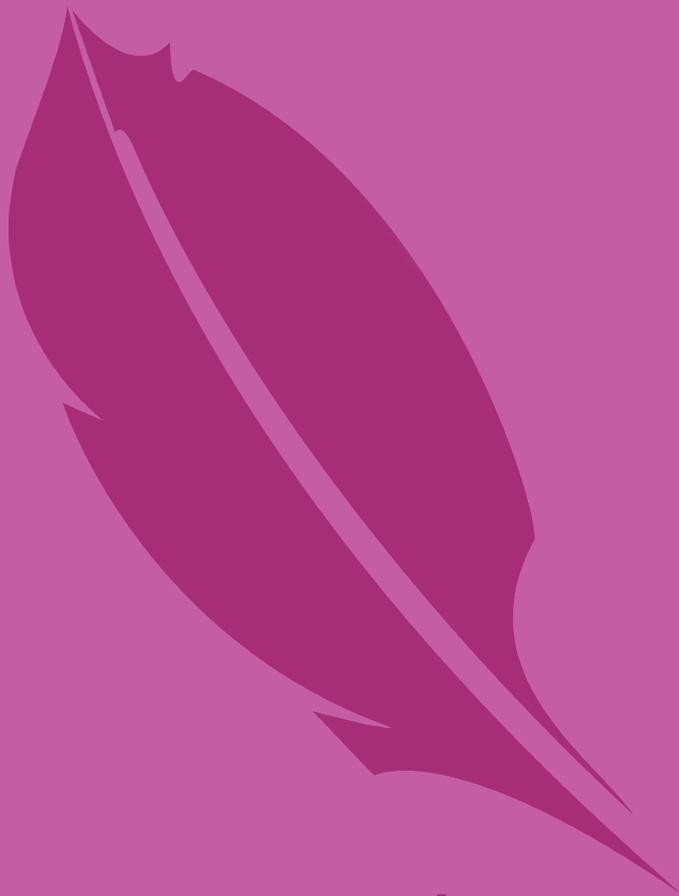


# Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos

Memorias del II Simposio Virtual de Investigación  
Aplicada a la Ingeniería de Procesos





Editorial  
**UNIMAR**

Colección Evento

**Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos**  
Memorias del II Simposio Virtual de Investigación  
Aplicada a la Ingeniería de Procesos

**Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos**

**Memorias del II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos**

Oscar Andrés Prado Rubio

Juan Sebastián Ramírez

Andrea Melisa Vásquez

Beethoven Narváez Romo

Mayra Alexandra Maya

Ángela Sofía Parra Paz

Víctor Alfonso Cerón

Jeremy Samboy Green

José Guido Moran Burgos

**Editor:** Luis Alberto Montenegro Mora

**Fecha de publicación:** Octubre 2015

**Páginas:** 116

**ISBN Electrónico:** 978-958-59072-3-2

**Info copia:** 1 copia disponible en la Biblioteca Nacional de Colombia

Existencias

Biblioteca Nacional de Colombia

**Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos**

**Memorias del II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos**

**Autores:**

Oscar Andrés Prado Rubio

Juan Sebastián Ramírez

Andrea Melisa Vásquez

Beethoven Narváez Romo

Mayra Alexandra Maya

Ángela Sofía Parra Paz

Víctor Alfonso Cerón

Jeremy Samboy Green

José Guido Moran Burgos

**Editorial:** Editorial UNIMAR, Universidad Mariana

**Fecha de publicación:** Octubre 2015

**Páginas:** 116

**ISBN Electrónico:** 978-958-59072-3-2

**Edición:** Primera

**Pie de imprenta:** San Juan de Pasto, Universidad Mariana, octubre 2015

**Formato:** Electrónico

**Colección:** Evento

**Materia:** Ingeniería de Procesos

**Materia de tópico:** Investigación Aplicada

**Palabras clave:** Ingeniería de Procesos, Investigación Aplicada

**País /Ciudad:** Colombia/ San Juan de Pasto

**Idioma:** Español

**Menciones:** Ninguna

**Visibilidad:** Página web Editorial UNIMAR, Universidad Mariana <http://www.umariana.edu.co/EditorialUnimar/> y <http://www.umariana.edu.co/ojs-editorial/index.php/libro-seditorialunimar>

**El libro se incluirá en el RILVI:** Sí

**Tipo de contenido:** Investigación aplicada a la Ingeniería de Procesos. Memorias del II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos

**Universidad Mariana**

Hna. Amanda del Pilar Lucero Vallejo f.m.i.

**Rectora**

Graciela Burbano Guzmán

**Vicerrectora Académica**

Hna. Marianita Marroquín Yerovi f.m.i.

**Directora Centro de Investigaciones**

Francisco Ricardo Mafía Chamorro

**Decano Facultad de Ingeniería**

Jaime Darío Quijano Melo

**Director Programa Ingeniería de Procesos**

Luis Alberto Montenegro Mora

**Director Editorial UNIMAR**

### **Comité Organizador**

Jaime Darío Quijano Melo  
**Coordinador General**

José Faruk Rojas Navarro  
**Coordinador Logístico**

Jorge Andrés Castro Lara  
**Coordinador Diseño**

Carlos Hernán Pantoja Agreda  
**Coordinador Publicidad**

Hugo Andrés Gomajoa Enríquez  
**Coordinador Sector Externo**

### **Comité Logístico**

José Faruk Rojas Navarro  
Daniel Solarte Álvarez  
Javier Mauricio Villota Paz  
Juan David Tutistar Guerrero  
Jhully Andrea Arellano Revelo  
Juan Sebastián Ruiz Rodríguez  
Melissa del Castillo Reynel Díaz  
María Cecilia Mera Bastidas

### **Comité de Conectividad**

Angie Alejandra López  
Ángela Daniela León Rodríguez  
Esteban Guerrero Fajardo  
Jorge Armando Cifuentes Guzmán  
Natalia Estefanía Muñoz

### **Comité de Publicidad**

Jorge Andrés Castro Lara  
Ángela Tatiana Terán López  
Juan Sebastián Gómez Ortiz  
María Alejandra Guerrero Matabajoy  
Paula Mercedes Obando Acosta

### **Editorial UNIMAR**

Luis Alberto Montenegro Mora  
**Director Editorial UNIMAR**

David Armando Santacruz Perafán  
**Diseño y Diagramación**

### **Correspondencia**

Editorial UNIMAR  
Universidad Mariana  
San Juan de Pasto, Nariño, Colombia  
Calle 18 No. 34 -104  
Tel: 7314923 Ext. 185  
E-mail : editorialunimar@umariana.edu.co

### **Depósito legal**

Biblioteca Nacional de Colombia Grupos Procesos Técnicos, Calle 24, No. 5 – 60 Bogotá D. C.

Biblioteca Central Gabriel García Márquez, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad Universitaria, Carrera 45, No. 26 – 85 Bogotá D. C.

Biblioteca Luis Carlos Galán Sarmiento, Congreso de la República de Colombia, Dirección General Administrativa, Carrera 6, No. 8 – 94 Bogotá D. C.

Biblioteca Rivas Sacconi, Instituto Caro y Cuervo, Sede Centro, Calle 10 No. 4-69 Bogota D.C. y sede Yerbabuena, kilómetro 24 autopista Norte Bogotá D.C.

Centro Cultural y Biblioteca Julio Mario Santo Domingo, calle 170 No. 67-51 Bogotá D.C.

Parque Biblioteca España, Cra. 33B # 107<sup>a</sup>-100, Medellín.

Centro Cultural Leopoldo López Álvarez – Área Cultural del Banco de la República en Pasto, Calle 19 No. 21-27 San Juan de Pasto.

Biblioteca Hna. Elisabeth Guerrero N. f.m.i. Calle 18 No. 34 -104 Universidad Mariana, San Juan de Pasto.

Biblioteca Alberto Quijano Guerrero, Universidad de Nariño, Calle 18 Carrera 50, Ciudad Universitaria Torobajo, San Juan de Pasto.

Las opiniones contenidas en el presente libro no comprometen a la Editorial UNIMAR ni a la Universidad Mariana, puesto que son responsabilidad única y exclusiva de los autores, de igual manera, es absoluta responsable del contenido de la obra, declarando que en su totalidad es producción intelectual propia, en donde aquella información tomada de otras publicaciones o fuentes, propiedad de otros autores, está debidamente citada y referenciada, tanto en el desarrollo del documento como en la sección final de referencias bibliográficas.

Se autoriza la reproducción total o parcial del material aquí consignado, sin fines comerciales, siempre y cuando se cite la fuente respectiva.



# Contenido

<b>Presentación</b>	9
<b>Alternativas de medición de color en la industria alimentaria: Practicidad y economía</b> Andrea Melisa Vásquez Riascos	13
<b>Estudo de viabilidade técnica de um sistema de cogeração para planta de processo, mangueiras hidráulicas</b> Beethoven Narváez Romo	27
<b>Estandarización de procesos: Un estudio de caso en una empresa multinacional de bebidas</b> Jeremy Samboy	37
<b>Inventario municipal de gases de efecto invernadero IMGEI TULÚA</b> José Guido Morán Burgos	43
<b>Diseño de procesos en Industria Láctea: Transformación de lactosuero</b> Juan Sebastián Ramírez-Navas	55
<b>Buenas Prácticas de Manufactura para alimentos en la provincia de Imbabura (Ecuador)</b> Mayra Alexandra Maya Nicolalde	65
<b>Efecto de Enzimas Comerciales en la Hidrólisis de Residuos de Cosecha de la Caña de Azúcar Pre-tratados con Órgano-solvente</b> Ángela Sofía Parra Paz	89
<b>Aplicación de un Sistema de Laguna Algal de alta tasa para el tratamiento de lixiviados</b> Víctor Alfonso Cerón Hernández	101
<b>Operación dinámica de sistemas para alcanzar intensificación de procesos</b> Oscar Andrés Prado Rubio	107
<b>Conclusiones</b>	115



## Presentación

Teniendo en cuenta el Decreto Único Reglamentario del Sector Educación, indicado bajo el número 1075 del 26 de mayo de 2015, emanado por el Ministerio de Educación Nacional; En la sección concerniente a la educación superior, en su apartes de justificación e investigación, se sugiere la constante revisión del estado de la educación en el área, y de la ocupación, profesión arte u oficio, en los ámbitos nacional e internacional. Igualmente las necesidades del país o de la región que, puedan tener relación con el programa en concordancia con referentes internacionales. En el mismo decreto, en lo referente a la Investigación Universitaria, particularmente las actividades que permitan desarrollar una actitud crítica y una capacidad creativa para encontrar alternativas de avance de la ciencia, la tecnología, las artes o las humanidades y del país indica, que los programas de educación superior deben prever la manera cómo van a promover la formación investigativa de los estudiantes o los procesos de investigación, o de creación, en concordancia con el nivel de formación y sus objetivos.

Igualmente considerando la propuesta de Política Pública construida sobre lo que el país espera para su educación superior reflejada en el acuerdo por lo superior 2034, particularmente en lo referido a los objetivos de desarrollar una educación superior universal y de calidad en todo tiempo y lugar, gracias a las tecnologías de la información, promoviendo el uso y apropiación de las tecnologías de la información y de la comunicación, y que las Instituciones de Educación Superior asuman éstas en sus procesos internos y modalidades de oferta académica, así como a la búsqueda de que la investigación responda mejor a las necesidades locales.

Finalmente, en consecuencia con el Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018 en su capítulo IV sobre educación “Colombia la más educada en 2025” en donde plantea en su visión que el País requiere un sistema de formación que permita a los estudiantes no solo acumular conocimientos, sino saber cómo aplicarlos, innovar, y aprender a lo largo de la vida para el desarrollo y actualización de sus competencias. Por otro lado, que el País debe promover espacios de divulgación y formación dentro del sector educativo y otros ámbitos que faciliten los procesos de transformación cultural y actitudinal necesarios para el avance del país en aspectos sociales, ambientales, institucionales, y para el establecimiento de una paz sostenible.

Tomando en cuenta los anteriores referentes nacionales y en concordancia con la Visión y Misión del Programa de Ingeniería de Procesos de la Universidad Mariana, se realizó el II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos, evento anual que se programa desde la Facultad de Ingeniería; para abrir un espacio de divulgación de experiencias investigativas y empresariales exitosas, en la aplicación de las áreas de formación en ingeniería y afines como estrategia de aprendizaje; y perfeccionamiento de la formación específica.

En el evento se realizaron diversas ponencias, producto de resultados de trabajos de investigación y experiencias aplicadas por expertos de carácter nacional e internacional en el campo de los Procesos, así como experiencias exitosas en la aplicación de las áreas de formación en ingeniería, en donde se trataron temas relacionados con procesos fisicoquímicos, biotecnológicos, en alimentos, agroindustriales y áreas afines que requieren de operaciones o procesos unitarios. De igual manera se presentan trabajos realizados dentro de procesos administrativos o de gestión, obedeciendo a que el programa de Ingeniería de Procesos tiene a los mismos como áreas de desempeño de los profesionales de formación.

Las Instituciones participantes fueron las siguientes :

- Compañía Operadora de Agua TECCA – República Dominicana.
- Centro Internacional de Agricultura tropical – CIAT - Colombia.
- Universidad Técnica de Dinamarca – Dinamarca.
- Universidad del Valle – Colombia.
- Universidad Técnica del Norte – Ecuador.
- Universidad Federal de Sao Pablo – Brasil.
- Universidad Nacional de Colombia – Colombia.
- Universidad Mariana – Colombia.

Por otra parte, con el evento se busca la contextualización del estado de la profesión en el área de procesos de transformación, administrativo o de gestión en los ámbitos nacional e internacional, con base en la tendencia de formación de los ponentes en las Instituciones donde se encuentran realizando o han terminado sus estudios. Como aporte a estos propósitos, el programa de Ingeniería de Procesos con satisfacción hace entrega de esta memoria de resúmenes de las 9 ponencias, quienes gracias a su generosa respuesta a la convocatoria realizada, han enriquecido con sus valiosos aportes objetivos específicos del evento como los siguientes:

- Generar espacios de aprendizaje y formación en el área de investigación desde diferentes áreas de fundamentación propias de la Ingeniería de Procesos para los asistentes al evento.
- Identificar tendencias de investigación en las diferentes áreas de fundamentación de la Ingeniería de Procesos y sus afines.
- Mejorar el que hacer docente e investigativo de los profesores, e investigativo de los estudiantes del programa de Ingeniería de Procesos y programas invitados de las diferentes instituciones de educación superior de la ciudad, a través de la socialización de experiencias de investigación de los ponentes invitados al evento.

El programa de Ingeniería de Procesos agradece de manera especial a los patrocinadores del Simposio por su apoyo y contribución para llevarlo a cabo y, en general, a todas las personas e Instituciones que con su entusiasmo, confianza, esfuerzo y dedicación influyeron para su consecución.

Esperamos que este documento sea significativo, satisfaga las expectativas de quienes lo consulten y sea referente para la gestión de calidad en la formación de nuestros ingenieros.

Adm. José Faruk Rojas Navarro c.M Sc.  
Ing. Jaime Darío Quijano Melo M Sc.





# Alternativas de medición de color en la industria alimentaria: Practicidad y economía

**Andrea Melisa Vásquez Riascos**  
Ingeniera Agroindustrial  
Magíster en Ingeniería Agroindustrial  
Docente Tiempo Completo – Universidad del Valle  
andrea.vasquez@correounivalle.edu.co

## Resumen

El color es un indicador que permite evaluar la calidad de los alimentos, convirtiéndose en parámetro crítico en la industria alimentaria, tanto para los productos en fresco como en aquellos procesados. La determinación de esta característica se realiza usando métodos como el visual, el analítico (colorímetros o espectrofotómetros) y actualmente se ha ampliado el de análisis de imágenes digitales integradas (DIA). Esta última técnica permite solucionar limitaciones encontradas en los métodos tradicionales por su practicidad y economía, y adquiere la característica deseada mediante una cámara digital o escáner que puede ser procesada posteriormente usando un software y extraer la información requerida. Se presenta una comparación entre el método tradicional por colorimetría para obtención de las coordenadas de color CIEL\*a\*b\* y el método DIA como nueva tecnología, transformando posteriormente las imágenes obtenidas mediante el uso de los software Matlab e ImageJ. Además se demuestra su aplicación en un caso de estudio donde la matriz alimentaria es un producto procesado de tomate, analizando cada coordenada de color de acuerdo con su error individual y general.

**Palabras clave:** Color, calidad, imágenes digitales.

## 1. Introducción

El color es una de las características superficiales más importantes de los alimentos y es un parámetro crítico de evaluación de la calidad de un producto (Foca, Masino, Antonelli & Ulrici, 2011; León, Mery, Pedreschi & León, 2006). A nivel industrial se hace uso de evaluaciones sensoriales o instrumentales, como herramientas de evaluación de esta característica. La evaluación sensorial puede verse afectada por la iluminación, el lugar de la prueba y la percepción del color por parte de los integrantes del panel, lo cual la convierte en una técnica subjetiva (León et al., 2006; Meléndez-Martínez, Vicario & Heredia, 2005; Wu & Sun, 2013).

Como técnicas instrumentales, se tiene el uso de los colorímetros que son los equipos estándares que permiten determinar el color superficial de las muestras; se considera el más acertado ya que simula la percepción del color de acuerdo con el ojo humano, siendo los más utilizados los colorímetros Minolta y Hunter  $L^*a^*b^*$  (León et al., 2006; Velioglu, Boyaci & Kurultay, 2011; Wu & Sun, 2013), los cuales nos presentan valores cuantitativos de los espacios de color  $L^*a^*b^*$ , RGB o XYZ-, aunque tienen la desventaja de que la superficie a medir debe ser uniforme, y el tamaño de la superficie de contacto es pequeña (2cm x 2cm) lo cual hace que las mediciones obtenidas sean poco representativas (León et al., 2006; Velioglu et al., 2011). Por otra parte, existen técnicas químicas para determinación del color que requieren del uso de protocolos, equipos robustos y especializados, y el uso de solventes orgánicos que permitan la extracción que provee el color a la muestra y su posterior análisis o cuantificación, como sostienen Cámara, Fernández-Ruiz, Redondo, Sánchez-Mata & Torrecilla (2012, citados por Malik, Erginkaya, Ahmad y Erten, 2014; Dewanto, Wu, Adom & Liu, 2002; Rao & Agarwal, 1999, citados por Castro y Murcia, 2013).

Finalmente, en la actualidad se investiga métodos rápidos, fáciles de usar y aplicar en la industria alimentaria, que permitan obtener características físicas e incluso propiedades químicas de los alimentos, entre las que se encuentra el color, conocidos como Sistemas de Visión Computarizada. Esta técnica mide pixel a pixel cada imagen completa de un alimento o muestra; el sistema está conformado por una cámara digital, lámparas que proporcionan una iluminación adecuada y un software para procesamiento (Jackman & Sun, 2004; Du & Sun, 2004; León et al., 2006; Meléndez-Martínez et al., 2005; Wu & Sun, 2013); tiene la ventaja de ser rápida, objetiva, práctica, consistente, no invasiva y económica (Wu & Sun, 2013). Considerando lo anterior, el uso del análisis de imágenes digitales en matrices alimentarias para determinación de color se convierte en una metodología económica, confiable y que puede desarrollarse en tiempo real.

La búsqueda de técnicas aplicativas en la industria alimentaria contribuye al desarrollo de la cadena agroindustrial de frutas y hortalizas; el caso aplicativo se desarrolló con el apoyo del Grupo de Investigación en Procesos Agroindustriales (GIPA), para lo cual se determinó el color mediante la técnica estándar por colorimetría y usando imágenes digitales de un producto derivado de tomate que, posteriormente fueron analizadas con los software Matlab e ImageJ; la comparación final se realizó calculando los errores para cada una de las coordenadas de color  $L^*a^*b^*$  y el error total entre las dos técnicas; se seleccionó como mejor método, aquel con un error cercano a cero y un coeficiente de correlación cercano a uno.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Definición de Color

El color es la respuesta mental o percepción del espectro visible de la luz que es reflejada o emitida por un objeto, señal que interactúa con la retina ubicada en el ojo y es transmitida al cerebro por el nervio óptico mediante impulsos eléctricos, lo que hace que los humanos asignen los colores a esta señal. Lo anterior quiere decir que el color es un efecto óptico en el que intervienen procesos fisiológicos, físicos y químicos; es una característica propia de cada objeto que, al cambiar la fuente de luz, modifica igualmente el color del objeto (Castañeda, 2005, p. 56; Wu & Sun, 2013). Esta sensación depende de factores como tipo de objeto, geometría, área, superficie, brillo, temperatura, entre muchos otros (Castañeda, 2005; Delmoro, Muñoz, Nadal, Clementz y Pranzetti, 2010, pp. 145-152; Wu & Sun, 2013).

### 2.2 Color en Alimentos

Los compuestos químicos o pigmentos responsables de los colores de las frutas y vegetales provienen principalmente de clorofilas, antocianinas y carotenoides, y dan una coloración verde, de azul a violeta y de rojo a amarillo, respectivamente (Mínguez, Pérez y Hornero, 2005, p. 3). Además del color, estos compuestos otorgan a las frutas y vegetales propiedades nutricionales importantes para la salud y el

bienestar humano (González, 2010; Hendry, 1992; Rodríguez-Amaya & Kimura, 2004). En la Figura 1 se presenta la clasificación de los colorantes naturales:

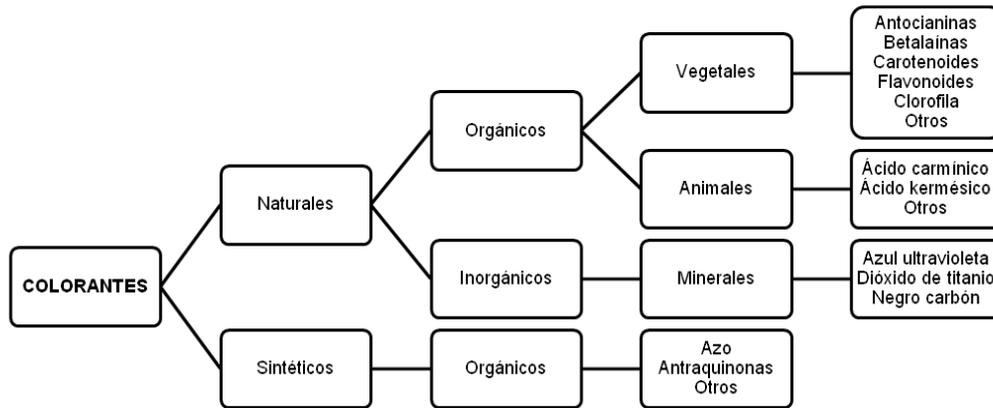


Figura 1. Clasificación de los colorantes naturales (García, Quintero y López, 2004, p. 481).

Las clorofilas son pigmentos de origen solubles en grasa, presentes en las plantas fotosintéticas, incluyendo las algas y en algunas bacterias fotosintéticas; son consideradas como parte fundamental de la dieta humana (Hendry, 1992; Madhava & Sowbhagya, 2012).

Las antocianinas son pigmentos catalogados como solubles en agua, ampliamente usados como colorantes alimenticios para bebidas y postres (Madhava & Sowbhagya, 2012).

Los carotenoides son sintetizados por plantas y microorganismos (Di Noia & Contento, 2010; Jamison, 2003), siendo las frutas y vegetales la principal fuente en la dieta humana. Cerca del 90% de los carotenoides está representado en la dieta y el cuerpo humano por el licopeno,  $\beta$ - caroteno,  $\alpha$ - caroteno, luteína y criptoxantina (Jamison, 2003); se ha reportado que los tomates y los productos derivados de tomate son la principal fuente de licopeno (Marković et al., 2006).

### 2.3 Métodos de Medición del Color

#### 2.3.1 Sensorial

Técnica de medición del color que utiliza un panel de evaluadores entrenados siguiendo las normas para medición de color en alimentos de cada país, que además se apoya en estándares de color como el Atlas RHS, las Guías Pantone y el Sistema Munsell, como material de referencia (Delmoro et al., 2010; León et al., 2006). La determinación de esta característica física es subjetiva (León et al., 2006; Novoa y Ramírez-Navas, 2012; Otles, 2008) y varía de un observador a otro, convirtiéndose en una técnica que requiere una inspección lenta y una preparación especializada de los observadores (León et al., 2006). La Tabla 1 indica los diferentes métodos de análisis sensorial aplicado en alimentos.

Tabla 1. Métodos de análisis sensorial

Análíticos discriminativos	Descriptivos	Afectivos	Dinámicos
Pruebas de Ordenamiento	Método de atributos	Prueba de preferencia simple o pareada	Intensidad versus tiempo
Método de umbrales	Método de puntajes		
Prueba A y no A	Método cuantitativo descriptivo (perfiles)	Escala hedónica	
Prueba pares diferencia o prueba pareada			
Prueba dúo – trío			
Prueba triangular			

Fuente: Universidad Nacional Abierta y a Distancia (2014).

Según Lawless y Heymann (2010) se debe controlar aspectos como:

- Color de fondo en el área de visualización: debe ser no reflectante y neutral; por lo general se utiliza un color gris mate, crema o blanquecino.

- Fuente de luz ( $^{\circ}$  K) y la intensidad (lux) en la superficie del producto: se recomienda una intensidad de luz entre 750 y 1200 lux; la fuente de luz debe elegirse para tener un alto índice de reproducción cromática (Ra).
- Ángulo de visión de panelistas y ángulo de incidencia de la luz sobre la muestra: se debe cuidar que estos dos ángulos no sean los mismos, ya que esto daría lugar a la reflexión de la luz y un alto brillo que generaría un error en el método. La iluminación de la cabina debe ubicarse verticalmente a las muestras y el ángulo de los panelistas sentados debe ser  $45^{\circ}$  a la muestra.

### 2.3.2 Instrumental

Las técnicas instrumentales para medición del color son aquellas en las cuales se mide la reflectancia o transmitancia de la muestra; los instrumentos de mayor uso en alimentos son espectrofotómetros y colorímetros triestímulos (Delmoro et al., 2010; Otles, 2008).

#### Espectrofotómetros

Miden la respuesta para toda la gama espectral visible de forma más amplia; son considerados más precisos que el colorímetro y capaces de captar más información de la muestra estudiada (Santos, 2009, p. 3). Estos instrumentos de medición pueden variar; sin embargo deben contener los siguientes elementos (Abril et al., s.f.):

- Fuente de energía radiante: procedente de una fuente de luz, en este caso una lámpara de deuterio y tungsteno.
- Monocromador: selecciona las radiaciones de una determinada longitud de onda (filtros, prismas).
- Compartimientos: espacios donde son alojados los recipientes transparentes (cubetas o tubos) que contienen las muestras; los materiales de dichos recipientes son vidrio, cuarzo o plástico transparente.
- Detector de luz y amplificador que convierte las señales luminosas en señales eléctricas.
- Registrador o sistema de lectura de datos.

El funcionamiento de este instrumento consiste en iluminar la muestra objetivo con luz blanca y calcular la cantidad de luz que ésta refleja en los intervalos de longitudes de onda; esto se consigue haciendo pasar la luz por el monocromador, el cual fracciona la luz en diferentes longitudes de onda. Los espectrofotómetros son instrumentos que requieren de previa calibración, realizada con una muestra blanca cuya reflectancia en cada segmento de longitudes de onda es conocida (Lockuán, 2013, p. 161).

#### Colorímetros triestímulos

Son instrumentos que miden los valores de una forma más directa y funcionan usando tres filtros de color (Capilla, Artigas y Pujol, 2002, p. 232; Lockuán, 2012); utilizan funciones de igualación del color correspondientes al observador colorimétrico de la CIE (por su nombre en francés, Commission Internationale de l'Eclairage, o International Commission on Illumination, por su correspondencia en inglés) (Capilla et al., 2002). Son los primeros desarrollados para este fin específico; su funcionamiento se basa en conceptos visuales de color, donde la muestra se ilumina en un ángulo de  $45^{\circ}$  con respecto a la línea perpendicular de la misma, como se aprecia en la Figura 2. En su funcionamiento la luz reflejada se mide directamente perpendicular a la muestra, logrando transportar esa luz por cuatro filtros de color, los cuales están diseñados para dar respuesta como tres funciones X, Y, Z considerado el observador estándar, logrando que el instrumento mida directamente los tres valores triestímulo X, Y, Z para un iluminante específico (Randall, 2010).

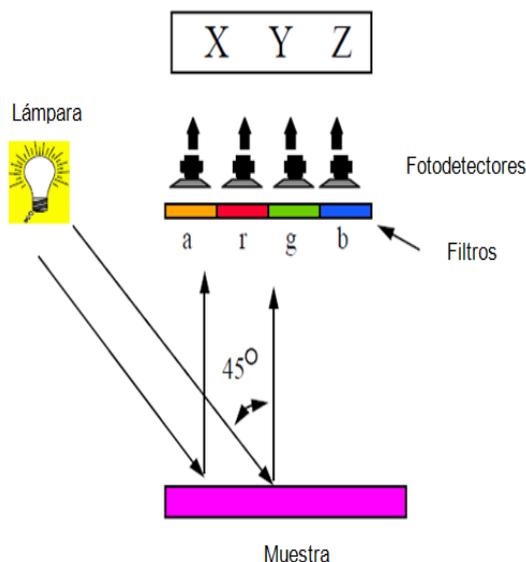


Figura 2. Diagrama de funcionamiento de un colorímetro triestímulo.

Fuente: Adaptado de Capilla et al. (2002).

## 2.4 Modelos de Color

Es la representación digital de los posibles colores contenidos en una muestra; los modelos típicos están basados en 3 o 4 componentes de color y divididos en 3 categorías, representadas en la Tabla 2 (Noor, Mokhtar, Rafiqul & Pramod, 2012; Wu & Sun, 2013):

Tabla 2. Clasificación de los modelos de color de acuerdo con tres categorías principales

Categoría de los Modelos	Característica	Modelos
Orientados a dispositivos	Son modelos de color dependientes del dispositivo que se relaciona y se ven afectados por la señal del dispositivo; como resultado, el color se ve afectado por las herramientas utilizadas para la visualización. Ejemplos: dispositivos de hardware usados para la percepción de la visión humana como la televisión o sistemas de video.	RGB, CMY (K), YIQ, YUV, YCbCr, HSI, HSV, HSL.
Orientados al usuario	Son modelos que permiten al usuario describir y aproximarse a las percepciones de la presentación del color; se considera un camino entre el observador y el dispositivo de medición.	HSI, HSV, HSL
Independientes del dispositivo	Son modelos en los que el color no se ve afectado por las propiedades del dispositivo de medición; no interfiere el desempeño del dispositivo.	Munsell, CIE XYZ, CIE LUV, CIE Lab.

Fuente: Noor et al. (2012); Wu & Sun (2013).

Los modelos más utilizados para la determinación del color son:

**2.4.1 Modelo de Color Munsell:** sistema creado por Albert H. Munsell, conocido como el más independiente; está representado por una forma cilíndrica con tres dimensiones: luminosidad o valor, matiz o tono y saturación o pureza del color; fue el primer modelo que diferencia los tres componentes, como se puede observar en la Figura 3.

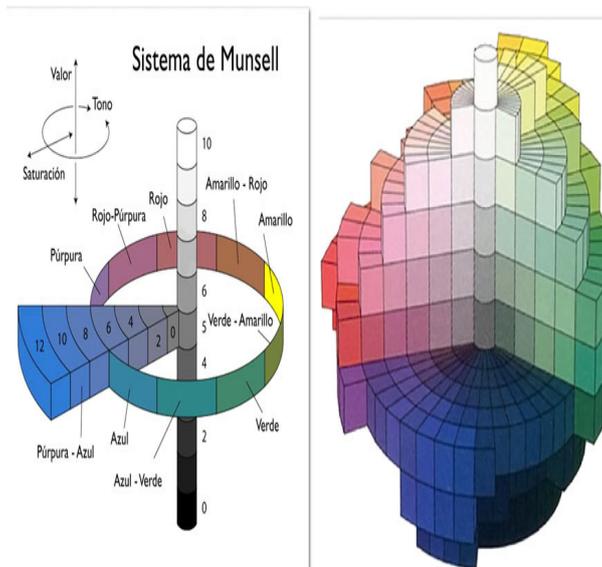


Figura 3. Representación del sistema Munsell.  
Fuente: Molinari (2011).

El “tono” se representa por una forma circular dividida en diez secciones, definidas como: rojo, amarillo-rojo, amarillo, verde-amarillo, verde, azul-verde, azul, púrpura-azul, púrpura y rojo-púrpura, que determinan el rango del tono. El componente “valor” está dividido en once secciones con relación a la claridad (blanco) que corresponde a 10, hasta el valor más oscuro (negro) que corresponde a 0, representado perpendicularmente. La saturación, que corresponde a una gama de colores, representa la combinación de cada parámetro de “valor” y “tono” (Noor et al., 2012).

**2.4.2 Modelo de color CIE XYZ:** propuesto en 1931 por la CIE, considerando que todos los colores visibles pueden ser definidos por valores positivos. Matemáticamente el modelo puede ser descrito como el componente de luminancia (Y) acompañado de dos coordenadas de cromaticidad X y Z, como se puede observar en la Figura 4 (Ford & Roberts, 1998, p. 31; Noor et al., 2012).

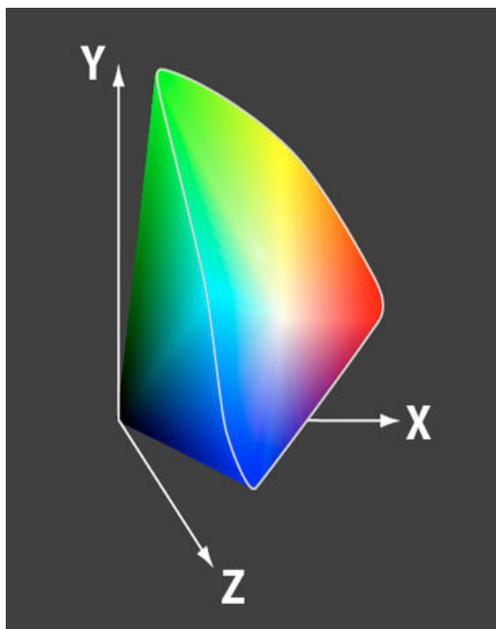


Figura 4. Representación del sistema CIE XYZ.  
Fuente: Valero (2012), p. 420).

El sistema CIE XYZ es usado actualmente como referencia para definir los colores que percibe el ojo humano, incluyendo otros espacios de color (Noor et al., 2012; Viscarra, Minasny, Roudier & McBratney, 2006). Las coordenadas en este espacio son generalmente llamadas X y Y que se derivan de XYZ.

**2.4.3 Modelo de color CIE LUV:** fue el primer espacio de color uniforme derivado del modelo CIE XYZ; cuenta con un punto blanco de referencia ( $X_n, Y_n, Z_n$ ) y corresponde al RGB (1, 1, 1); la representación del sistema CIE LUV se presenta en la Figura 5.

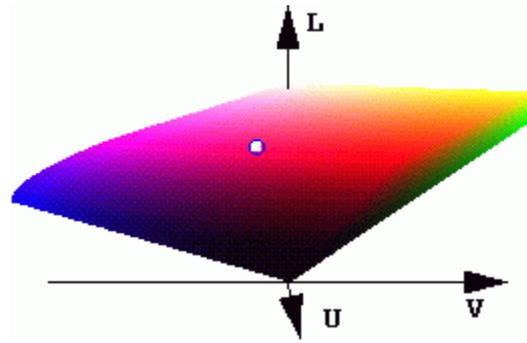


Figura 5. Representación del sistema CIE LUV.  
Fuente: Noor et al. (2012).

Los valores L representan la claridad, y U, V representan las correlaciones presentes entre croma y tono (Noor et al., 2012).

**2.4.4 Modelo de color CIELAB:** desarrollado por la CIE en el año 1976 para lograr una mejora en la representación del color; se considera el modelo más completo; es usado ampliamente para describir los colores que puede percibir el ojo humano. El modelo  $L^*a^*b^*$  determina el color de acuerdo con la posición en el espacio en tres dimensiones (3D) (Noor et al., 2012).

El componente  $L^*$  corresponde a la luminosidad del color ( $L = 0$  significa negro;  $L = 100$  significa blanco);  $a^*$  es el croma donde los valores positivos corresponden a rojo y los negativos al color verde;  $b^*$  es el tono para este componente; los valores positivos corresponden a amarillo y aquellos valores negativos se refieren a azul;  $a^*$  y  $b^*$  son los dos componentes cromáticos cuyos valores van desde -120 a 120 (León et al., 2006); esta representación se puede observar en la Figura 6 (Ford & Roberts, 1998; CEI, 2004; Noor et al., 2012).

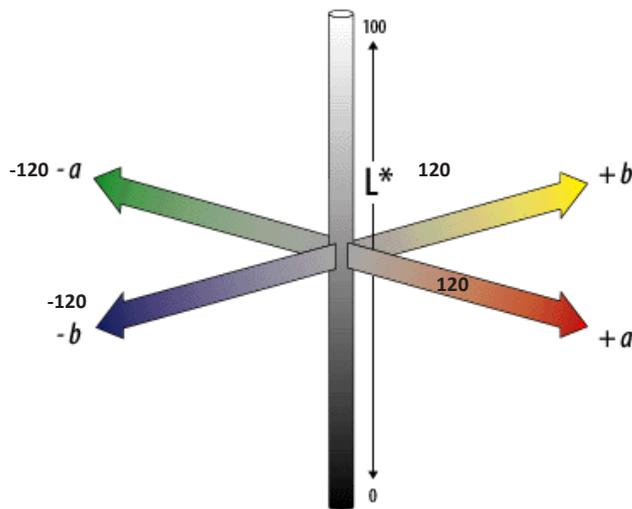


Figura 6. Representación del sistema CIE  $L^*a^*b^*$  o CIELAB.  
Fuente: Noor et al. (2012).

**2.4.5 Modelo de color RGB:** es el modelo orientado al dispositivo más usado (Ford & Roberts, 1998), diseñado en el año 1996; su nombre se deriva de las siglas en inglés “Red, Green, Blue” correspondiente a los colores primarios en los que se basa -rojo, verde y azul-, colores primarios que pueden ser mezclados para lograr producir nuevos colores del espectro (CEI, 2004; Noor et al., 2012), como se puede observar en la Figura 7.

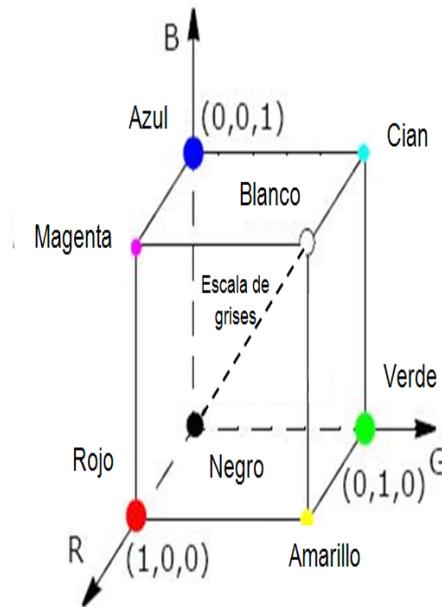


Figura 7. Representación del modelo de color RGB.  
Fuente: Adaptado de Noor et al. (2012).

De acuerdo con la representación del modelo, cuando los tres colores primarios son igualados a cero, el color que se obtiene es el negro; y en su esquina opuesta, cuando los colores primarios en los que se basa el modelo son igualados a su máximo valor 255, se obtiene el color blanco. Este modelo RGB es ampliamente usado en aplicaciones informáticas, ya que no requiere de un proceso de transformación posterior (Ford & Roberts, 1998).

## 2.5 Imágenes Digitales

Si bien la colorimetría es un método ampliamente usado para la determinación del color basándose en técnicas visuales, o utilizando instrumentos colorimétricos de alto costo económico como los colorímetros y espectrofotómetros que presentan carencias en la descripción completa de las respuestas (Padrón, 2009), con la presente investigación se pretende indagar en la adquisición de imágenes digitales para la determinación del color, como una opción económica que permita la adquisición de las coordenadas de una forma más fácil y completa.

En la industria de alimentos se ha incrementado el desarrollo y uso de métodos no invasivos para evaluar la calidad (Lin, Cavinato, Mayes, Smiley, Huang, Al-Holy & Rasco, 2003), presentándose el uso de cámaras digitales como una opción para la medición del color; una de las ventajas más atractivas es el menor costo, en comparación con otros instrumentos convencionales (Padrón, 2009). El uso y procesamiento de imágenes digitales nace por el desarrollo y disposición de recursos tecnológicos que permiten captar y manipular grandes cantidades de información en forma de matrices de valores (Esqueda y Palafox, 2005). Una imagen digital es un archivo electrónico formado en elementos propios de imagen, siendo los píxeles cuadrados su expresión, cuando son exhibidos en un dispositivo de observación como la pantalla de una computadora. La imagen que puede observarse es una matriz en dos dimensiones o bidimensional de miles o millones de píxeles, donde cada uno tiene su propia dirección, tamaño y correspondiente representación del color (Peterson, 2005, p. 8).

### 2.5.1 Adquisición de imágenes y visión computarizada

El análisis de imágenes involucra la investigación de los datos que ésta puede proporcionar de acuerdo con la aplicación específica; se debe determinar el método para extraer dicha información. Este proceso requiere el uso de herramientas para lograr la segmentación de la imagen, además de la transformación y extracción de la información. Este último paso es el proceso que permite la adquisición de la mayor información de la imagen, como la forma o el color de la misma (Umbaugh, 2010). En la Figura 8 se presenta el diagrama de adquisición y procesamiento de imágenes digitales que son procesos básicos de la visión computarizada.

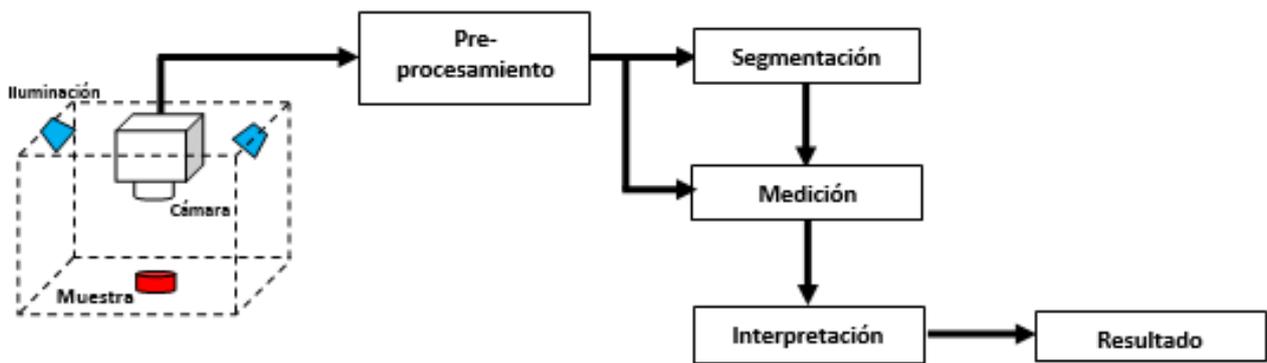


Figura 8. Representación de un proceso de análisis de imágenes digitales.

Fuente: Adaptado de Mery & Pedreschi (2005).

### 3. Conclusiones

El uso del software Matlab en el procesamiento de imágenes digitales depende de la resolución y calidad de la imagen a analizar, lo cual determina el tiempo de procesado.

El procesamiento de imágenes digitales utilizando el software ImageJ permite un análisis rápido de la totalidad de la imagen.

El uso del sistema de visión computarizado requiere de factores relevantes en la adquisición de la imagen como la iluminación, lo cual indica que debe asegurarse una alta calidad de esta condición.

Los sistemas de visión computarizada son alternativas en tiempo real, bajo costo, practicidad, fácil adquisición y economía, que pueden aportar al control de calidad de productos alimentarios.

## Bibliografía

- Abril, N., Bárcena, J., Fernández, E., Galván, A., Jorrín, J., Peinado, J., et al. (s.f.). 8. Espectrofotometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. Recuperado de: [http://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/o8\\_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf](http://www.uco.es/dptos/bioquimica-biol-mol/pdfs/o8_ESPECTROFOTOMETR%C3%8DA.pdf)
- Capilla, P., Artigas, J., & Pujol, J. (2002). *Fundamentos de Colorimetría*. Valencia, España: Editorial Universidad de Valencia. Recuperado de: <http://www.iberlibro.com/Fundamentos-colorimetr%C3%ADa-Jaume-Pujol-Ramo-Artigas/7416935845/bd>
- Castañeda, W. (2005). *Color*. Manizales: Universidad de Caldas, Artes y Humanidades. Recuperado de: <http://gbs.libriadelau.com/index.php?isbn=9789588231167>
- Castro, V. y Murcia, C. (2013). *Licopeno y Salud humana*. Cali, Colombia, Universidad Santiago de Cali: ReCiTeLA - V. 12 N. 2
- Delmoro, J., Muñoz, D., Nadal, V., Clementz, A., Pranzetti, V. (2010). El color en los alimentos: Determinación de color en mieles. *Invenio* 13(25). UAEM Redalyc.Org. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87715116010>
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. K., & Liu, R. H. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(10), 3010–4. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11982434>
- Di Noia, J., & Contento, I. (2010). Fruit and vegetable availability enables adolescent consumption that exceeds national average. *Nutrition Research* 30(6), 396–402. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2917227/>
- Esqueda, J. & Palafox, L. (2005). *Fundamentos de procesamiento de imágenes*. Mexico: Universidad de Baja California.
- Foca, G., Masino, F., Antonelli, A. & Ulrici, A. (2011). Prediction of compositional and sensory characteristics using RGB digital images and multivariate calibration techniques. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/51739121\\_Prediction\\_of\\_compositional\\_and\\_sensory\\_characteristics\\_using\\_RGB\\_digital\\_images\\_and\\_multivariate\\_calibration\\_techniques](http://www.researchgate.net/publication/51739121_Prediction_of_compositional_and_sensory_characteristics_using_RGB_digital_images_and_multivariate_calibration_techniques)
- Ford, A. & Roberts, A. (1998). *Colour space conversions*. Recuperado de: <http://www.poynton.com/PDFs/coloureq.pdf>
- García, M., Quintero, R. y López, A. (2004). *Biotecnología alimentaria*. México. Editorial Limusa. Recuperado de: <http://www.linio.com.co/Biotecnologia-alimentaria---Mariano-Garcia-Garibay,-Rodolfo-Quintero-Ramirez,-Augustin-Lopez-Munguia-%28Coordinadores%29-1072198.html>
- González, I. (2010). *Caracterización química del color de diferentes variedades de guayaba (Psidium guajava L.) colombiana*. Universidad Nacional de Colombia. (Trabajo de Grado de Maestría). Recuperado de: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2815/>
- Hendry, G. (1992). Chlorophylls and chlorophyll derivatives. In G. Hendry & J. Haughton (Eds.), *Natural food colorants* (pp. 79–103). Londres.
- Jackman, P. & Sun, D. Application of Computer Vision Systems for Objective Assessment of Food Qualities. En: Cho, Y. & Kang, S. (2011). *Emerging technologies for Food Quality and Food Safety Evaluation*. United States of America: Taylor and Francis Group. pp. 79-112
- Jamison, J. R. (2003). Dietary diversity: a case study of fruit and vegetable consumption by chiropractic patients. *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 26(6), 383–9. Recuperado de: <http://www.jmptonline.org/article/S0161-4754%2803%2900071-X/references>
- Lawless, H. & Heymann, H. (2010). *Sensory evaluation of food: Principles and practices*. New York: Springer. Recuperado de: [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=yrlfrVgU6CsC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Lawless,+H.+T.,+%26+Heymann,+H.+\(2010\).+Sensory+evaluation+of+food:+Principles+and+practices.](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=yrlfrVgU6CsC&oi=fnd&pg=PR6&dq=Lawless,+H.+T.,+%26+Heymann,+H.+(2010).+Sensory+evaluation+of+food:+Principles+and+practices.)
- León, K., Mery, D., Pedreschi, F. & León, J. (2006). Color measurement in Lab units from RGB digital images. In *Food Research International* (Vol. 39, pp. 1084–1091). Recuperado de: <http://web.ing.puc.cl/~dmery/Prints/ISI-Journals/2006-FoodResInt-ColorMeasurementLab.pdf>

- Lin, M., Cavinato, M., Mayes, D., Smiley, S., Huang, Y., Al-Holy, M. & Rasco, B. (2003). Bruise detection in Pacific Pink Salmon (*Oncorhynchus gorboscha*) by visible and short wavelength near-infrared (SW-NIR) spectroscopy (600-1100 nm). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(22), 6404–6408.
- Lockuán, F. (2013). V. La industria textil y su control de calidad. Tintorería. Recuperado de: <https://archive.org/details/V.LITYSCDC>
- Madhava, N. & Sowbhagya, B. (2012). Technological advances in food colours. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/profile/Madhava\\_Naidu/publication/222690660\\_Studies\\_on\\_extraction\\_and\\_antioxidant\\_potential\\_of\\_green\\_coffee/links/0fcfd50174d65923ff000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Madhava_Naidu/publication/222690660_Studies_on_extraction_and_antioxidant_potential_of_green_coffee/links/0fcfd50174d65923ff000000.pdf)
- Malik, A., Erginkaya, Z., Ahmad, S. y Erten, H. (2014). Food processing: Strategies for Quality Assessment. New York: Springer. Recuperado de: <https://books.google.com.co/books?id=1a1xBQAAQBAJ&pg=PA469&dq=%282012%29.+Radial+basis+network+analysis+to+estimate+lycopene+degradation+kinetics+in+tomato->
- Marković, K., Hruškar, M., & Vahčić, N. (2006). Lycopene content of tomato products and their contribution to the lycopene intake of Croatians. *Nutrition Research*, 26(11), 556–560. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0271531706002144>
- Meléndez-Martínez, A., Vicario, I. & Heredia, F. (2005). Correlation between visual and instrumental colour measurements of orange juice dilutions: effect of the background. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950329304001247>
- Mery, D. & Pedreschi, F. (2005). Segmentation of colour food images using a robust algorithm. *Journal of Food Engineering*, 66(3), 353–360. doi:10.1016/j.jfoodeng.2004.04.001
- Mínguez, M., Pérez, A. y Hornero, D. (2005). Pigmentos carotenoides en frutas y vegetales; mucho más que simples “colorantes” naturales. Recuperado de [http://digital.csic.es/bitstream/10261/5754/1/IG\\_AGROCSIC\\_4.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/5754/1/IG_AGROCSIC_4.pdf)
- Molinari, M. (2011). El sistema Munsell como herramienta fotográfica. Recuperado de: <http://www.molinaripixel.com.ar/notas/2011/el-sistema-munsell-como-herramienta-fotografica/>
- Noor, I., Mokhtar, H., Rafiqul, K., & Pramod, M. (2012). Understanding Color Models : A Review. *ARPN Journal of Science and Technology*, 2(3), 265–275. Recuperado de: [http://www.haralick.org/DV/understanding\\_color\\_models.pdf](http://www.haralick.org/DV/understanding_color_models.pdf)
- Novoa, D. y Ramírez-Navas, J. (2012). Caracterización colorimétrica del manjar blanco del Valle. *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 10(2), 54–61. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/257021761\\_CHARACTERIZACION\\_COLORIMETRICA\\_DEL\\_MANJAR\\_BLANCO\\_DEL\\_VALLE](http://www.researchgate.net/publication/257021761_CHARACTERIZACION_COLORIMETRICA_DEL_MANJAR_BLANCO_DEL_VALLE)
- Otles, S. (2008). Handbook of food analysis instruments. (CRC Press, Ed.) Recuperado de: <https://www.crcpress.com/product/isbn/9781420045666>
- Padrón, C. (2009). Sistema de visión computarizada y herramientas de diseño gráfico para la obtención de imágenes de muestras de alimentos segmentadas y promediadas en coordenadas CIE L\*a\*b\*. *Agronomía Costarricense*, 33(2), 283 – 301. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Peterson, K. (2005). Introduction to basic measures of a digital image for pictorial collections. Washington. Recuperado de: <http://www.loc.gov/rr/print/tp/IntroDgtlImage.pdf>
- Randall, D. (2010). Instruments for the measurement of color. Recuperado de: [http://industrial.datacolor.com/support/wp-content/uploads/2013/01/Instruments-for-Color-Measurement\\_72.pdf](http://industrial.datacolor.com/support/wp-content/uploads/2013/01/Instruments-for-Color-Measurement_72.pdf)
- Rodríguez-Amaya, D. & Kimura, M. (2004). Harvestplus Handbook for Carotenoid Analysis. Recuperado de: <http://www.ifpri.org/sites/default/files/publications/hptech02.pdf>
- Santos, P. (2009). Medición del color. Espectrofotómetro: el ojo electrónico. Zaragoza. Recuperado de: [http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala\\_prensa/revista\\_tecnica/hemeroteca/articulos/R42\\_A3.pdf](http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R42_A3.pdf)
- Umbaugh, S. E. (2010). Digital image processing and analysis: human and computer vision applications with CVIPtools. (2a. Ed.). Recuperado de: <https://www.crcpress.com/product/isbn/9781439802052>

Universidad Nacional Abierta y a Distancia. (2014). Métodos de análisis sensorial. Recuperado de: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401552/Capitulo\\_8/ejemplo9.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/401552/Capitulo_8/ejemplo9.html)

Valero, A. (2012). *Principios de color y holopintura*. Barcelona, España: Editorial Club Universitario.

Velioglu, H. M., Boyaci, I. H., & Kurultay, S. (2011). Determination of visual quality of tomato paste using computerized inspection system and artificial neural networks. Recuperado de: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=es&user=hyz207wAAAAJ&citation\\_for\\_view=hyz207wAAAAJ:u-x6o8ySGosC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=hyz207wAAAAJ&citation_for_view=hyz207wAAAAJ:u-x6o8ySGosC)

Viscarra, R., Minasny, B., Roudier, P. & McBratney, A. (2006). Colour space models for soil science. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/223723277\\_Colour\\_space\\_models\\_for\\_soil\\_science](http://www.researchgate.net/publication/223723277_Colour_space_models_for_soil_science)

Wu, D. & Sun, D. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5–20. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/236970104\\_Colour\\_measurements\\_by\\_computer\\_vision\\_for\\_food\\_quality\\_control\\_\\_A\\_Review](http://www.researchgate.net/publication/236970104_Colour_measurements_by_computer_vision_for_food_quality_control__A_Review)





# Estudo de viabilidade técnica de um sistema de cogeração para planta de processo, mangueiras hidráulicas

**Beethoven Narváez Romo**

Magíster en Ingeniería Mecánica, Energía y fluidos,  
Especialista en Energías Renovables, Eficiencia Energética y Generación Distribuida.  
Universidad de Sao Paulo, Brasil.

Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Colombia - Medellín.  
betonarmo@gmail.com

## Resumo

A cogeração é empregada em diferentes campos da indústria e aplicações gerais, visando um melhor aproveitamento energético, tais como a indústria açucareira, termoelétricas, alimentícia, química, petroleira, só para mencionar algumas. No entanto, essa tecnologia não está sendo bem sucedida no Brasil devido às incertezas econômicas com os custos do combustível e a regulação da mesma. Este trabalho foi focado no estudo de um caso real na indústria de mangueiras de borracha, encontrando a melhor configuração em questões técnicas e econômicas. Para isto, foram levantados os valores atuais de operação do sistema convencional e comparados com os possíveis arranjos de cogeração. Os arranjos técnicos foram baseados nas configurações conhecidas na literatura; (1) *bottoming*, (2) *topping*. Além disso, foi realizado um estudo sobre um possível cenário de eficiência energética na configuração atual. Os resultados mostraram umas viabilidades técnicas e econômicas para o ciclo *topping*, tendo um tempo de retorno simples de 2,8 anos. No entanto, a configuração de eficiência energética não foi viável em termos econômicos devido ao custo do gás natural.

**Palavras chave:** Cogeração, *Topping*, *Bottoming*, Eficiência energética.

## 1. Introdução

A cogeração nasceu por uma necessidade evidente de dar melhor aproveitamento do combustível, já que as crises do petróleo dos anos 1973 e 1978 têm obrigado às companhias a procurar alternativas energéticas, como pode ser notado ao longo da história. A palavra cogeração foi instaurada pelos Estados Unidos da América – EUA no ano 1977, pelo presidente James Earl “Jimmy” Carter Jr., referindo-se à produção de eletricidade e outras formas de energia útil na mesma instalação. Foi finalmente definida em 1980, pela *Federal Energy Regulatory Commission – FERC* como a produção sequencial de energia elétrica ou mecânica e de energia útil, a partir da mesma fonte primária (Sala, 1999).

Atualmente, os sistemas de cogeração representam várias vantagens em comparação aos sistemas de produção de potência convencionais, porém o comportamento da cogeração está inerente aos preços dos combustíveis no mercado. Isto significa que pode existir um empreendimento tecnicamente viável, mas a dificuldade econômica não tem o mesmo comportamento, provocando desestímulo para fazer novos investimentos nessa área extremamente importante.

Na cogeração, a facilidade de operação, a confiabilidade dos sistemas, o maior fator de utilização energético, a versatilidade dos equipamentos junto com a necessidade diminuir os impactos ambientais visa um cenário positivo para esse tipo de projeto. Já que, por exemplo, eficiência conjunta de conversão de energia química dos combustíveis em energia útil 35-50% passa para valores perto de 85%, representando um ganho favorável para a instalação.

No Brasil, há vários empreendimentos de cogeração, porém, ainda existe grande potencial de crescimento. No entanto, não há uma política clara nesse campo como preço dos combustíveis, juros e encargos, autoprodução, etc.

O presente trabalho apresenta um estudo de cogeração para uma companhia dedicada à manufatura de mangueiras multiusos de borracha, visando apresentar uma alternativa energética integrada para melhor aproveitamento do combustível, baseado na existência de processos simultâneos e sequenciais, como são a geração de energia elétrica, a produção de frio e o aproveitamento de energia de baixa entalpia para processo de regeneração.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1 Conceitos gerais

Ciclo de uma máquina de calor (*cyclic heat Power plant*): o escoamento passa ao longo de um circuito fechado, através de um ciclo termodinâmico, no qual o calor é recebido de uma fonte de alta temperatura (aquecimento indireto), o calor é rejeitado a um meio de baixa temperatura e o trabalho produzido é entregue, usualmente a um gerador elétrico.

Planta de potência (*Power plant*): faz referência a um circuito aberto, onde requer fonte térmica (normalmente provem do combustível), porém não há circulação dos gases de combustão no circuito. Entretanto, o seu desempenho pode ser avaliado como um sistema fechado de uma planta cíclica e pode ser calculado como:

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$$

Heat rate: chamado também de consumo específico, sendo o inverso da eficiência térmica, dado por:

$$HR = \frac{Q_{caldeira}}{W} = \frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}PCI}{\dot{W}}$$

Calor latente: é a energia necessária para que um fluido passe, desde a linha de líquido saturado até a linha de vapor saturado, isto à mesma pressão de operação.

Calor sensível: é a energia líquida usada unicamente para produzir um diferencial de temperatura no líquido quando interage com outro sistema ou com o meio.

Combustão estequiométrica: oxidação do combustível com a medida certa de comburente. Perto desse ponto, atinge-se a maior temperatura de chama adiabática.

Processo Isocórico: processo a volume constante.

Processo Isobárico: processo a pressão constante.

Processo Isotérmico: processo a temperatura constante.

Processo Isentrópico: processo a entropia constante.

Fator de utilização de energia (FUE): termo que relaciona a energia aproveitada de maneira simultânea (trabalho de eixo mais térmica) por uma unidade de energia consumida.

$$FUE = \frac{W + Q_u}{\dot{m}PCI}$$

Cabe ressaltar que esse parâmetro não é satisfatório pela diferença na qualidade de energia, assim, pode-se usar o rendimento equivalente em função dos preços da energia em forma de calor e eletricidade, ( $p_e$ ) e ( $p_c$ ), respectivamente (Sala, 1999).

$$\eta_{equiv} = \frac{W}{\dot{m}PCI} + \frac{p_e Q_u}{p_c \dot{m}PCI}$$

Ciclo de Carnot: ciclo ideal representado por dois processos isentrópicos e dois processos isotérmicos, em que é atingida a máxima eficiência possível de uma máquina térmica. Usa-se como referência de comparação e pode ser expresso em função das temperaturas de alto ( $T_H$ ) e baixo ( $T_L$ ) nível, sendo:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

## 2.2 Cogeração

Define-se a cogeração como a geração simultânea e sequencial de duas ou mais formas de energia, tais como energia elétrica, calor ou produção de frio. A Figura 1 apresenta a comparação entre o sistema convencional e o de cogeração, verificando que há um aumento considerável no aproveitamento energético da mesma unidade de combustível. Pode-se ver que as perdas passam de 65% para 15%, significando menor poluição e maior economia. Cabe ressaltar que embora a Figura 1 seja esquemática, há processos reais que podem ter esses comportamentos energéticos.

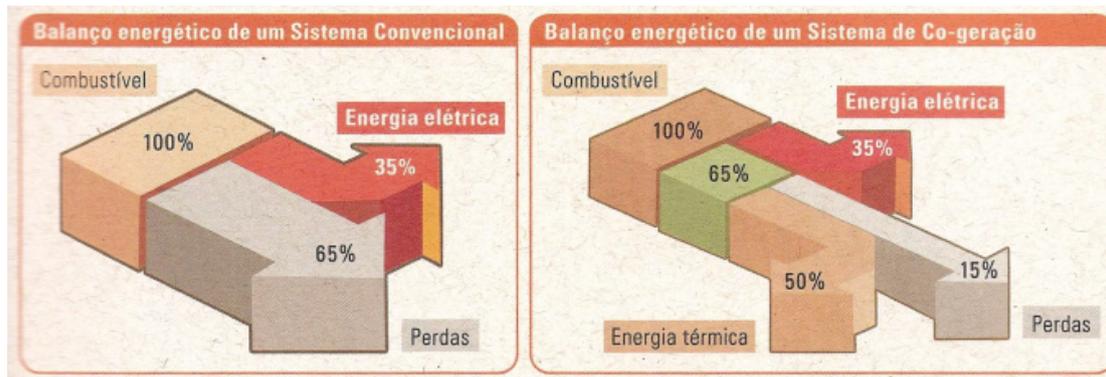


Figura 1. Comparação do balanço energético entre um ciclo convencional e um sistema de cogeração. Fuente: Andreos (2013).

Um sistema de cogeração pode ser classificado de acordo à satisfação da necessidade a ser suprida, seja a energia em forma de calor ou a energia elétrica. Assim, tem-se, o ciclo *bottoming* e o ciclo *topping*. A seguir, é explicado cada um deles.

### 2.2.1 Ciclo Bottoming

Nesse tipo de ciclo o combustível é queimado para produzir altas temperaturas, e calor é rejeitado do processo para produzir potência usando uma caldeira de vapor e um turbo gerador (Figura 2). As áreas típicas de aplicação são indústrias de cimento, cerâmicos, aço e gás, sendo menos comuns comparadas com as plantas *topping* (Thermal Energy Equipment, 2014). Em termos gerais, poderia resumir-se que o ciclo *bottoming* prioriza a demanda térmica em referência à demanda elétrica ou mecânica. Esse ciclo se viabiliza quando o combustível demandado é de baixo custo, como é encontrada nas usinas de cana-de-açúcar e indústria de papel e celulose (Andreas, 2013).



Figura 2. Ciclo Bottoming de cogeração. Fuente: Andreos (2013).

### 2.2.2 Ciclo Topping

Este tipo de ciclo o combustível é usado para produzir potência em primeiro lugar e energia térmica depois, sendo o mais popular na indústria da cogeração. Assim, o combustível inserido na câmara de combustão é empregado para produzir trabalho de eixo, convertendo-a em energia elétrica através de um gerador. Esse ciclo é vantajoso em relação ao ciclo *bottoming* devido ao postulado de Clausius-Kelvin, assim, a prioridade é dada sobre a energia de alta qualidade.



Figura 3. Ciclo Topping de cogeração. Fuente: Andreos (2013).

## 2.3 Descrição e configuração do processo de fabricação das mangueiras

O atual sistema utiliza de uma extrusora que produz as mangueiras continuamente, as quais seguem para uma piscina de resfriamento. A piscina é alimentada por dois *chillers* elétricos, com condensação a água. Após o resfriamento, as mesmas são encaminhadas para a vulcanização, processo que é alimentado

por uma caldeira que produz 8.000 kg/h de vapor de água, na temperatura de 185° C e pressão de 1,03 MPa, sendo impossível reaproveitar o vapor remanescente e o condensado por causa dos compostos corrosivos adquiridos durante o processo. A Figura 3 mostra o esquema da produção.

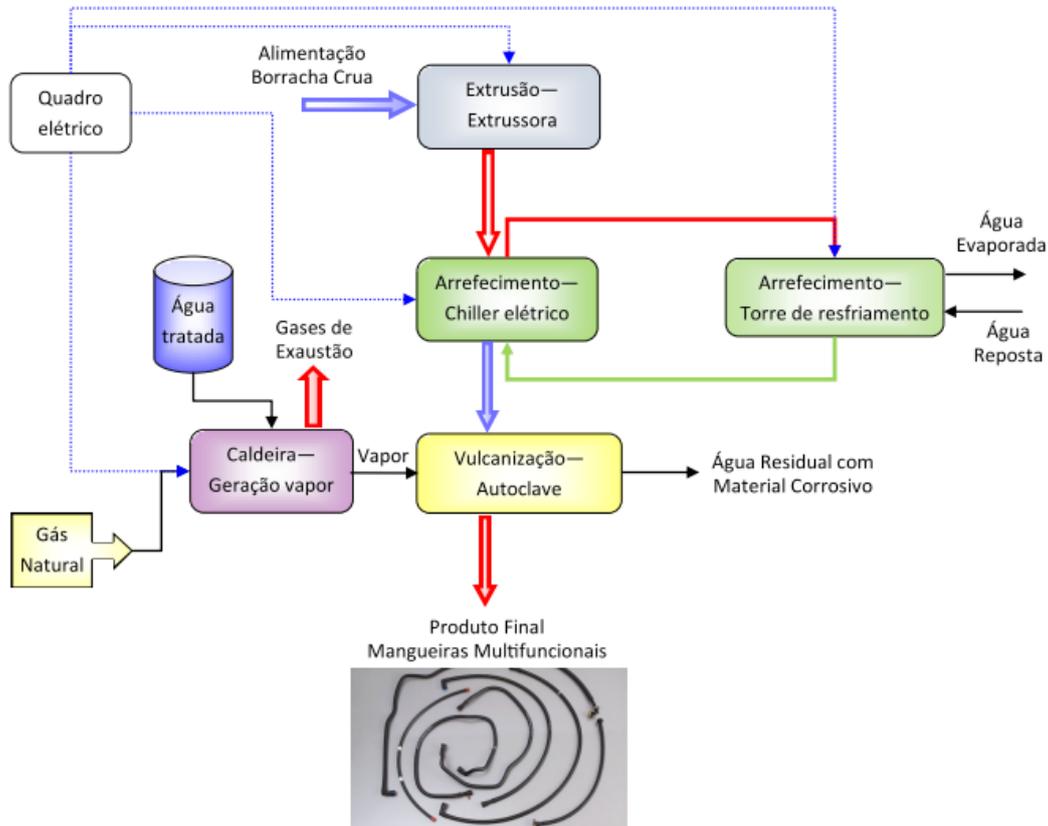


Figura 4. Representação esquemática do processo de produção de mangueiras multiusos.

Nesta configuração, os custos operacionais observados são do consumo de gás natural na caldeira, que gera vapor para o processo de vulcanização e, a demanda e consumo elétrico dos chillers. De forma a constituir uma linha de base de consumo para estabelecer comparações com as alternativas propostas, foram calculados os custos de cada sistema e comparados com as novas alternativas. É importante observar que os dados fornecidos pela empresa foram restritos, portanto, algumas premissas foram adotadas para completar os cálculos.

Os dados fornecidos do sistema elétrico são demanda contratada de 2.900 kW e a conexão da empresa é na rede da AES Eletropaulo, do tipo A4 e a tarifa é Verde.

Na geração de vapor, o consumo médio de gás natural é 658,4 m<sup>3</sup>/h, alcançando um volume mensal de 231.760 m<sup>3</sup>. Para o resfriamento das mangueiras antes do processo de vulcanização são utilizados dois chillers com potência elétrica de 10 kW cada, rendimento de 70%, que utilizam como fluido refrigerante o R-404 e entregam a água com uma temperatura de 8°C. A água é encaminhada para uma piscina que recebe as mangueiras da extrusão. Alerta-se aqui que a mesma é descoberta; se fosse coberta, evitaria a perda térmica para o ambiente, melhorando a eficiência do processo. Os chillers são do tipo condensação a água e, portanto, são alimentados com água de condensação que provem da torre de resfriamento.

### 3. Alternativas propostas para cogeração

A seguir, serão apresentadas propostas de cogeração para o sistema explicado, bem como as devidas análises econômicas.

### 3.1. Proposta Ciclo “Bottoming”

Conforme explicado anteriormente, o ciclo “bottoming” visa o atendimento da energia térmica necessária da planta e a produção de energia elétrica em segundo plano. Esta primeira proposta estabelece uma configuração de cogeração que procura atender toda a demanda térmica (Figura 3.2) da unidade industrial, independente da demanda elétrica.

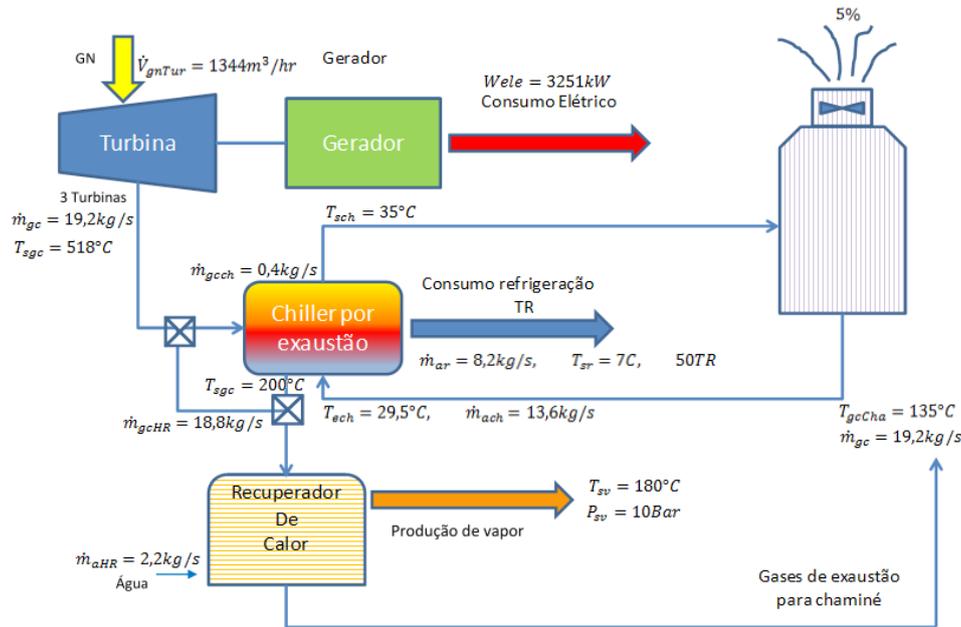


Figura 5. Representação esquemática do arranjo proposto para o ciclo “Bottoming”.

Como resultado, a geração de energia elétrica terá excedente na produção, que devem ser comercializados para melhorar o resultado financeiro da implantação. Para a geração de energia elétrica será utilizado três turbinas a gás, um recuperador de calor para geração de vapor e um chiller de absorção alimentado por gases de exaustão. As turbinas a gás, da marca *Turbomach*, modelo *Saturn 20*.

Após a saída dos gases, os mesmos são conduzidos ao recuperador de calor, que deverá gerar o vapor a ser utilizado no processo de vulcanização. Como a temperatura de saída de turbinas a gás é alta, este tipo de aproveitamento é comum principalmente na indústria.

### 3.2. Proposta Ciclo “Topping”

Nesta proposta, o ciclo “topping” visa o atendimento da demanda de energia elétrica, independente da demanda por energia térmica. Também serão utilizadas turbinas a gás, chiller de absorção e recuperador de calor, mas como o foco é o atendimento da demanda elétrica, será necessário um consumo adicional de gás natural para complementar a geração de vapor e aproveitamento térmico pelo chiller.

Apesar de se tratar de outro conceito de ciclo, os equipamentos selecionados serão os mesmos, porém, em quantidades ou capacidades diferentes (Figura 3.3). No caso das turbinas a gás, serão utilizadas apenas duas. Cabe ressaltar, embora haja outras referências de turbinas, a temperatura de saída foi a chave para a escolha. No caso do chiller, será o mesmo, pois, como mencionado anteriormente, a seleção do mesmo foi em função da capacidade térmica. Como a demanda térmica de resfriamento é pequena, foi selecionado o chiller com a menor capacidade térmica disponível. Também será utilizado um recuperador de calor, porém, com a diferença de que, neste caso, este recuperador deverá possuir um queimador auxiliar para complementar a carga térmica de aquecimento para geração de vapor. Além da geração de vapor, a queima auxiliar deverá fornecer calor suficiente aos gases de exaustão para serem aproveitados no chiller de absorção.

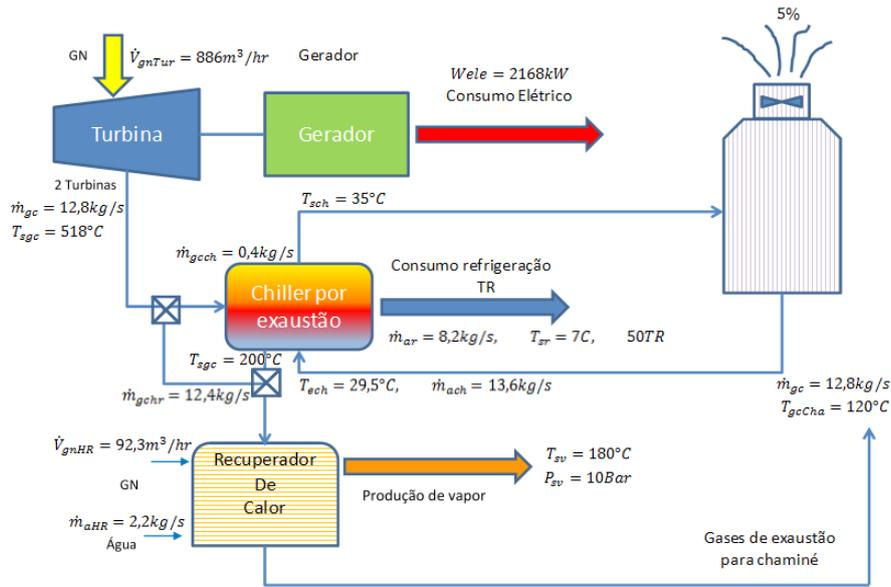


Figura 6. Representação esquemática do arranjo proposto para o ciclo "Topping".

### 3.3 Ações de Eficiência Energética

Além dos resultados obtidos com a cogeração, também é possível fazer algumas modificações na instalação atual, visando o uso eficiente da energia. Atualmente, os gases de exaustão da caldeira são descarregados na atmosfera, sem nenhum aproveitamento da sua energia térmica. Apenas com o uso dos gases, pode-se substituir os chillers elétricos por um chiller de absorção, que aproveita a energia térmica dos gases para resfriar, reduzindo a demanda elétrica da instalação, e para o preaquecimento da água de ingresso à caldeira (Figura 3.4).

Estas ações podem ser realizadas com menores investimentos e no curto prazo, indicadas para o início de um processo de eficiência energética na empresa, que acarreta benefícios para os investidores, para o processo, o sistema elétrico brasileiro e o meio ambiente.

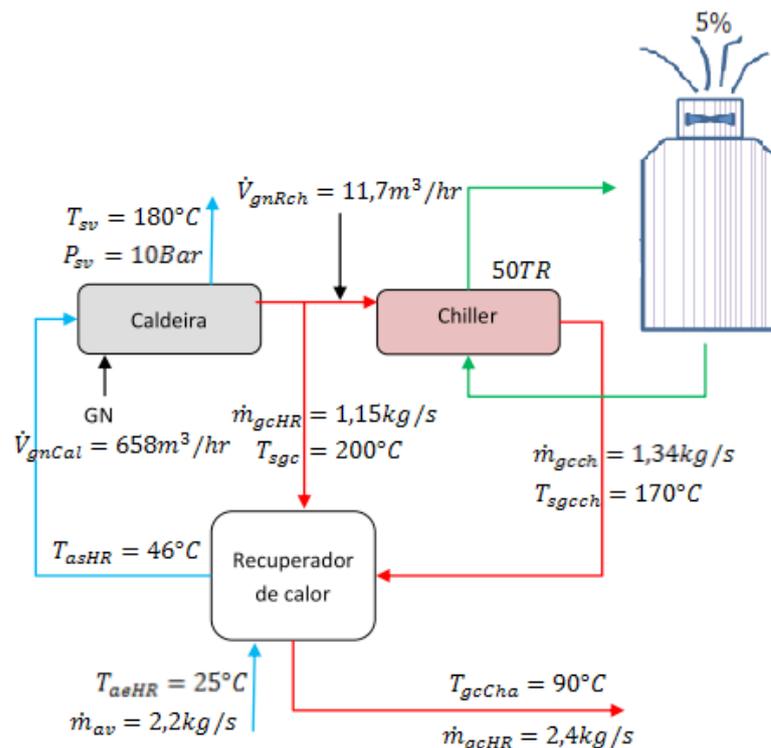


Figura 7. Representação esquemática da proposta de eficiência energética.

Para a sugestão proposta, seria necessário de uma queima suplementar de gás natural, visto que a temperatura dos gases de exaustão da caldeira é da ordem de 200°C e, a temperatura mínima de entrada no chiller é 275°C, que implica no consumo de 11,7 m<sup>3</sup>/h a mais de gás natural para operar o chiller de absorção.

#### 4. Conclusões

A cogeração é um tipo de geração distribuída que apresenta viabilidade técnica e muitas possibilidades de arranjos e equipamentos que podem ser utilizados. Infelizmente, muitos destes equipamentos ainda são importados, o que torna o investimento inicial alto, tornando o período de retorno maior.

Outra dificuldade na análise econômica é o fato das tarifas de gás natural terem aumentado constantemente nos últimos anos e, por outro lado, as tarifas de energia elétrica reduziram. Como a viabilidade econômica é estabelecida na comparação do custo de geração pela cogeração e pela tarifa de energia elétrica, muitos projetos foram abandonados por conta disso.

Atualmente, o Brasil enfrenta um momento delicado no setor energético. A exposição provocada pela estiagem reduziu a capacidade de geração hidrelétrica e aumentou a participação das térmicas centralizadas no setor elétrico, tornando a energia elétrica mais cara. Porém, pelas regras atuais, os consumidores só irão sentir estes efeitos na revisão tarifária do ciclo seguinte. O problema desta forma de tarifação é o sinal econômico errado ao consumidor, que durante o período de energia mais cara, ainda paga um preço que não reflete a realidade do setor. As bandeiras tarifárias serão implantadas para corrigir parte deste erro. Neste contexto, a cogeração deve ser incentivada para reduzir a demanda do sistema através do uso racional da energia e promover a eficiência energética e redução de perdas nas redes de distribuição.

Em alguns casos específicos, como no sistema analisado por este trabalho, que demanda um alto consumo de gás natural para geração de vapor para processo, torna a cogeração viável, principalmente pelo fato do aproveitamento térmico gerado pelas turbinas a gás e pela mudança nas tarifas, já que a cogeração tem incentivo e possui uma tarifa menor que para o segmento industrial.

#### Referencias

- Andreos, R. (2013). Slides de Aula – Cogeração. Especialização em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Sala, J. (1999). Cogeneración: Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos. Universidade de País Vasco, Bilbao, Espanha.

#### Bibliografia

- ANEEL. (2014). Resolução Homologatória nº 1.759, de 03 de Julho de 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20141759.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- \_\_\_\_\_. (2006). Resolução Normativa nº 235, de 14 de Novembro de 2006. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- Arsesp. (2014). Deliberação ARSESP nº 496, de 27 de Maio de 2014. Disponível em <<http://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl4962014.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- Brizuela, E. (2003). Apuntes de Clase para Turbomáquinas 67. UBA.
- Bureau of Energy Efficiency. Waste heat recovery. Disponível em <[http://beeindia.in/energy\\_managers\\_auditors/documents/guide\\_books/2Ch8.pdf](http://beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch8.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2014.
- Çengel, Y. A., B. M. A. (2006). Termodinâmica. (5ª. Ed.). Mc Graw Hills. ISBN 85-86804-66-5
- Frank, J. Gas turbine performance characteristics. Power Systems. Schenectady, NY. GER-3567H. pp. 1-16.
- Narváez, R. (2015) Monografia. Estudo de viabilidade técnico-econômica de cogeração e eficiência energética aplicada ao processo de fabricação de mangueiras multiusos. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Simões-Moreira, J. (2012). Aplicações da termodinâmica. Notas de aula. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos - SISEA.

Thermal Energy Equipment – Cogeneration. Energy Efficiency Guide for industry in Asia. Disponível em <[www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org)>. © UNEP. Pag. 1-19. Acesso em: 20 out. 2014.

Thermax India. (2014). Catálogos Técnicos. Disponível em <<http://www.thermaxindia.com/Absorption-Cooling/Products/Vapour-Absorption-Machines/Exhaust-Vapour-Absorption-Machine.aspx>>. Acesso em: 07 nov. 2014.



# Estandarización de procesos: Un estudio de caso en una empresa multinacional de bebidas

**Jeremy Samboy**

Ingeniero Químico,

Universidad Autónoma de Santo Domingo

Compañía Operadora del Agua-Tecca SRL-Dominicana

jeremysamboy@gmail.com

## Resumen

El presente estudio de caso se desarrolla en una multinacional de bebidas, cuando se decidió instalar una planta de producción en la República Dominicana. Luego de 6 meses de instalación se procedió a la puesta en marcha y estabilización, donde los resultados fueron lotes fuera de especificación que no cumplían con los límites permitidos en los parámetros: Grados Brix, acidez titulable, conductividad y color. Dentro de las estrategias para resolver estos problemas se utilizó lo siguiente: 1. Lluvia de ideas, relacionando los problemas con posibles causas mediante diagramas de causa y efecto. 2. Enumeración de las 6 causas principales de variabilidad (6M): Materiales, Mano de obra, Maquinaria, Mediciones, Medio ambiente y Métodos. 3. Medición de las 6M, lo cual incluyó establecimiento de indicadores, uso de diagramas de paretos, histogramas, gráficos de control, índice de capacidad del proceso, cálculo de la varianza total de cada fuente de variabilidad, entre otros. 4. Separación de las causas comunes y las causas especiales. 5. Implementación de medidas de control para cada causa común, y planes de eliminación de las causas especiales. 6. Cálculo de relaciones matemáticas entre las variables, modelación mediante datos estadísticos del proceso de elaboración de los lotes, usando la información estadística y mediante pruebas de laboratorio. 7. Creación de métodos estándares en las áreas de elaboración, validación y análisis de los lotes. 8. Implementación de las relaciones matemáticas para el uso de todo el personal. Finalmente, se logró realizar lotes cada media hora, con una merma de 1%.

**Palabras clave:** Bebida, Grado brix, Acidez titulable, Conductividad, Color, Proceso.

## 1. Introducción

El presente estudio de caso corresponde a la experiencia generada en una multinacional de bebidas no carbonatadas. La empresa multinacional líder en el mercado mundial decide instalar una planta de producción en la República Dominicana, con el objetivo de eliminar la importación de productos en este país y acceder a otros mercados para el suministro de bebidas en todo el Caribe. Con esta visión empresarial se instala la planta de producción de bebidas, usando una tecnología de producción nueva en América Latina para esta empresa. Luego de seis meses de instalación se procedió a la puesta en marcha y estabilización de toda la nueva tecnología, y es en este momento donde los resultados no fueron los esperados, presentándose lotes de producto que no cumplían con la especificación, algo normal en todo arranque, sin embargo estos problemas continuaron por los siguientes meses, generando una problemática que empezó a afectar completamente el funcionamiento de la empresa.

## 2. Desarrollo

Los problemas de estandarización de procesos son normales en los arranques de nuevas líneas de producción, mas no pueden sobrepasar determinado límite de tiempo puesto que empiezan a generar pérdidas para las empresas. Teniendo en cuenta que los problemas superaron los límites de tiempo (seis meses), se empezó con el análisis del proceso teniendo en cuenta como punto de partida, que cada lote de producción de las bebidas debía estar dentro de los límites de especificación, en los siguientes parámetros principales:

- Grados Brix: asociados a la concentración de azúcares,
- Acidez titulable: propia del producto,
- Conductividad: traducida en cantidad de sales utilizadas,
- Color: deseable para el producto.

Una vez identificados los parámetros principales se analizó cada uno de ellos para determinar los retos y objetivos, a través del diagnóstico del proceso. En su fase inicial se podría establecer que era un problema simple de mezclado, sin embargo, el análisis detallado del proceso y el levantamiento del diagnóstico arrojaron los siguientes resultados:

- Si bien se conocía los componentes de los ingredientes del lote, éstos venían en cajas controladas y pesadas para cada uno, desconociendo su composición individual; por lo tanto no se tenía un control directo sobre los ingredientes de la formulación. El único parámetro que se podía ajustar era el grado brix que se realizaba a través de la cantidad de azúcar; no obstante, este ajuste no podía generar lotes con modificaciones en la formulación total del producto final, puesto que de ser así, el lote se rechazaba completamente. Uno de los retos fue entonces poder ajustar los brix a través de la adición del azúcar, sin afectar los demás parámetros mínimos requeridos para la aceptación del producto.

Además cada parámetro presenta una relación antagónica, de manera que si el grado brix está fuera de parámetro y se debe diluir el lote, podría bajar la acidez titulable del producto, generando otro incumplimiento en las características y un posible rechazo.

- No se tenía fórmulas matemáticas que relacionaran los parámetros ni los ingredientes en el arranque y puesta en marcha de la planta de producción, haciendo difícil su cálculo por la poca información sobre la materia prima usada (lo cual es un secreto de la casa madre).
- Cada lote podía durar un máximo de 12 horas para ser envasado; en caso contrario debía ser rechazado, lo que implicaba que las soluciones fueran aplicadas en la marcha, antes del tiempo máximo de envasado; de lo contrario, se perdería nuevamente otro lote de producción.
- Asimismo, había problemas con el sistema automático que controlaba la dosificación de los ingredientes.
- Si bien todos los lotes salían fuera de especificación, los mismos variaban dependiendo del operador que los elaboraba o el analista que los validaba, obedeciendo al sabor del producto, el tanque donde se elaboraba, el orden en que se dosificaba, entre otros.

- Los lotes eran ajustados por prueba y error por parte de los asesores, y más tarde por los operadores del área de procesos, tardando entre unas 3 a 4 horas promedio en su elaboración, produciendo unos 6 lotes al día, debiendo ser unos 40 lotes al día, teniendo una eficiencia del 15% y una merma de tiempo de 21 horas diarias con una merma en material del 30% de los lotes.

Ante el diagnóstico realizado se ejecutó los siguientes pasos para resolver este problema:

### 2.1 Entender el problema

- Catalogar todos los problemas mediante lluvia de ideas, y relacionarlos con posibles causas mediante diagramas de causa y efecto.
- Enumerar y agrupar los problemas dentro de las seis (6) causas principales de variabilidad (6M), que son: Materiales, Mano de obra, Maquinaria, Mediciones, Medio ambiente y Métodos.

### 2.2 Cuantificar el problema

Se procedió a realizar diferentes mediciones de cada una de las 6M, para lo cual se estableció parámetros e indicadores. Se implementó herramientas de calidad como: gráficos de paretos, para poder determinar cuáles son los vitales y cuáles son los triviales. Se calculó el Cp y el Cpk (índices de capacidad) para cada etapa del proceso, la materia prima y los operadores. Se calculó la varianza de cada etapa y a partir de esto la varianza total, con el objetivo de determinar cuáles etapas aportaban mayor variabilidad al proceso total; esto incluyó la materia prima, las máquinas, los operadores, los turnos, los tipos de producto, los tanques de elaboración, incluyendo además la variación aportada a los resultados por el proceso de validación en el laboratorio, para lo cual se realizó un ANOVA Gage R&R en el mismo. Se efectuó gráficos de control a cada una de estas etapas y se identificó las causas comunes de las causas especiales. Se realizó un análisis al ciclo de mezclado, evaluando la efectividad del diseño de agitación, la velocidad de mezclado efectiva por cada ingrediente, el envío de los ingredientes a través de las tuberías, la lógica de control automático, para determinar la eficiencia en la mezcla de cada ingrediente.

### 2.3 Controlar el problema

- Implementación de medidas de control para cada causa común, y planes de eliminación de las causas especiales; esto incluyó implementación del análisis de los parámetros de calidad antes y después de agregar el concentrado al lote; se implementó sistemas de seguridad anclados al sistema automático para prevenir errores, ajuste de los tiempos de envío de los ingredientes hacia el tanque de elaboración, y ajuste de los empujes de agua para evitar dilución de los mismos.
- Mayores controles en la materia prima.
- Cálculo de relaciones matemáticas entre las variables, para lo cual se llevó a cabo progresiones lineales a partir de los datos; se calculó el grado brix que aporta cada ingrediente y se realizó un balance de materia mediante grado brix. Se comparó las ecuaciones obtenidas a través de las regresiones y de los balances y se obtuvo una ecuación semi-empírica gracias a esta comparación. Luego se comparó la constante que igualó la ecuación obtenida por balance con las varianzas del sistema y se encontró explicación a través de la variación natural, aportando al proceso (ruido).

### 2.4 Pensar en el sistema, no en las personas.

Creación de métodos estándares en las áreas de elaboración, validación y análisis de los lotes, lo cual incluyó confirmación en el área de almacén antes de realizar cada lote; estandarización de los métodos de elaboración, lo cual implicó la forma en que se dosificaba los ingredientes y los RPM a que se debía disolver cada uno, la implementación de las relaciones matemáticas creadas en hojas de Excel para el uso de todo el personal, el cual generaba la fórmula a usar dependiendo del brix de cada lote de jarabe, además de fórmulas de ajuste que garantizaran que ningún parámetro se saldría de control.

Los principales resultados que se obtuvo dentro del ajuste de la planta de producción fueron los siguientes:

- Reducción del tiempo de elaboración a media hora, con una merma de tiempo de un 1%.
- Aumento de la eficiencia en tiempo en un 100%.
- Reducción del tiempo de ajuste a media hora (luego se llegó hasta 15 minutos).
- Reducción del personal de elaboración y la necesidad de personal especializado, ya que las cantidades de cada ingrediente eran generadas por hojas de Excel.
- Reducción del tiempo de entrenamiento del personal de 2 meses a una semana.

### **3. Conclusiones**

Todo problema que se presenta en cualquier proceso es el resultado de la suma de todas las fuentes de variación que le afectan en ese momento, sea un problema común o un problema especial, por lo que es fundamental la caracterización, medición o cuantificación de estas fuentes de variación, para luego relacionarlas matemáticamente con la salida del proceso o resultado, implementando soluciones que las eliminen o controlen, para así poder obtener los resultados deseados.

La estandarización de estas soluciones por medio de sistemas es la única manera de asegurar su perpetuidad, controlando así la personalización de los métodos de trabajo por cada operador, y la afectación de los resultados, por su rotación.





# Inventario municipal de gases de efecto invernadero IMGEI TULÚA

**José Guido Morán Burgos**

Geógrafo  
Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT  
jgmoran@cgiar.org

## Resumen

El IMGEI Tuluá proporcionó información relevante de las emisiones de gases de efecto invernadero en unidades de carbono equivalente para diferentes sectores con base en la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por su sigla en inglés). Se generó una herramienta técnica que facilitó la gestión del cambio climático en el municipio, convirtiéndose en un instrumento útil para los procesos de planificación y la toma de decisiones con rigor científico, de manera articulada y coordinada.

A nivel nacional el inventario nacional de gases de efecto invernadero de la tercera comunicación nacional de cambio climático de IDEAM indicó una cifra preliminar de 212.000 Gg CO<sub>2</sub> eq aproximadamente. Los cálculos de emisiones arrojaron que el sector con mayor cantidad de emisiones en el municipio de Tuluá fue el de agricultura, con un 58%. Por ende es necesario trabajar en herramientas que brinden medidas de mitigación, permitiendo establecer mecanismos, actividades y procesos de agricultura sostenible. Los datos por subsectores, en comparación con los niveles nacionales, demostraron el bajo aporte del municipio, que alcanzó valores por debajo del 0.4% de las emisiones nacionales, situación que brinda metas alcanzables para lograr la meta de carbono neutral para el municipio de Tuluá.

Los datos de emisiones en función de la cantidad de habitantes del municipio arrojan como resultado la generación de 1.1 Ton de CO<sub>2</sub> eq por habitante al año. En comparación con la cifra nacional de 4.2, el dato es muy significativo ya que representa el 25% del consolidado nacional.

**Palabras clave:** Cambio climático, Tuluá, gases de efecto invernadero, GEI.

## 1. Introducción

El cambio climático es en la actualidad uno de los fenómenos a escala mundial que más impactos ocasiona a nivel socioeconómico y ambiental. Fue éste el motivo para que diferentes países, tanto desarrollados como en vía de desarrollo se hayan unido para hacerle frente a esta anomalía, especialmente a su causa principal: las emisiones de gases de efecto invernadero. Se ha logrado grandes avances a partir de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático - CMNUCC y del Protocolo de Kioto.

Actualmente Colombia hace parte de la CMNUCC, por lo cual ha adquirido una serie de compromisos como el desarrollo de los Inventarios de Gases efecto Invernadero. Se ha presentado ante la CMNUCC dos de estos reportes, y actualmente se realiza el nuevo Inventario de GEI a nivel nacional para el año 2010, siguiendo la metodología del Panel Intergubernamental de Cambio Climático –IPCC versión revisada de 2006.

A nivel regional se ha iniciado esfuerzos para lograr estimar emisiones de GEI y así identificar el impacto que ocasiona el desarrollo de la economía local en cuanto a la magnitud de emisiones. Así mismo, se identifica los sectores con potenciales altos en implementación de medidas de mitigación, lo que se convierte en la base para direccionar adecuadamente inversiones de desarrollo sectorial en las regiones.

A nivel departamental y municipal se ha incentivado a las entidades competentes en la importancia de desarrollar estos estimativos. El municipio de Tuluá en el Valle de Cauca, es pionero en el país en iniciar un esfuerzo intersectorial en el desarrollo del Inventario de GEI para la región. Esta iniciativa hará de Tuluá una región que cuente con una visión más explícita sobre cómo abordar la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y el desarrollo sostenible de los sectores.

Un inventario de gases de efecto invernadero es importante para determinar la magnitud de las emisiones en una región específica, atribuibles a la actividad humana (emisiones antropogénicas). Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es identificar las principales fuentes de emisión de GEI en el municipio de Tuluá, siendo éste el insumo técnico que oriente la toma de decisiones más acertada a nivel local y regional en materia de proyectos y políticas de mitigación del cambio climático.

## 2. Metodología

### 2.1 Inventario de gases de efecto invernadero

El método usado para estimar una emisión o absorción de una fuente específica, es el siguiente:

Estimación de la emisión = Datos de actividad x Factor de emisión donde:

- Los datos de actividad describen la magnitud anual de una actividad (p. ej., número de cabezas de ganado).
- Factor de emisión, es la masa de los GEI emitidos por unidad de actividad (p. ej., Gg CH<sub>4</sub>/cabeza de ganado).

### 2.2 Serie de tiempo

Para que este inventario regional sea comparable con los datos de los inventarios nacionales, se seleccionó el año 2010 como el periodo base para la estimación de emisiones. Actualmente Colombia desarrolla el inventario nacional para este mismo periodo de tiempo, y se continuará presentando ante la CMNUCC cada dos años.

### 2.3 Fases de desarrollo del Inventario

Las etapas en las que se desarrolla un inventario de GEI inician con la revisión de las metodologías del IPCC, con el fin de conocer y comprender los diferentes métodos de cálculo, las variables requeridas y el tipo de resultado a obtener. Posteriormente, con el listado de fuentes de emisión por sector, que contemplan las directrices del IPCC, se selecciona sólo aquellas que serán comprendidas dentro del estudio, dado que son actividades que se lleva a cabo en la región y que generan emisiones de GEI.

Así, inician las actividades relacionadas con la consolidación de información sectorial, para lo cual el equipo coordinador del inventario debe apoyarse en los expertos sectoriales y en las entidades competentes de gestionar y administrar la información de los sectores de energía, los procesos industriales, de agricultura y de servicios públicos domiciliarios.

Para la selección de los factores de emisión, de los tres niveles metodológicos del IPCC, se seleccionó el nivel 1 (Factores de emisión por defecto del IPCC. Datos de actividad básicos y menos desagradados) para el inventario de Tuluá, dado que no existen factores de emisión estimados en la región.

Posteriormente se procede al cálculo de emisiones por tipo de fuente y por GEI generado. Para hacer una comparación exhaustiva e identificar las categorizas clave o principales fuentes de emisión, todas las emisiones estimadas (emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) se convierten en CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub> eq) por medio de su potencial de calentamiento global (PCG) (Ver Tabla 1).

Tabla 1. *Potencial de calentamiento global*

<b>Gas Efecto Invernadero</b>	<b>Potencial de Calentamiento Global - PCG</b>
CO2	1
CH4	21
N2O	310

Fuente: IPCC (2006).

### 3. Resultados

#### 3.1 Sector Energía

En el sector de energía se estima emisiones de GEI generadas por actividades relacionadas con la quema, extracción y manipulación de combustibles fósiles (petróleo y sus derivados, carbón y gas natural). Actividades de exploración y explotación de las fuentes primarias de energía, no fueron tenidas en cuenta en este inventario (Figura 1), ya que según los reportes no se practica actividades como el aprovechamiento de yacimientos petroleros o explotaciones de carbón a gran escala. La conversión de las fuentes primarias de energía a sus derivados a energía eléctrica tampoco fue objeto de estudio ya que no existen refinerías en la región, y la energía eléctrica proviene de hidroeléctricas y no de la quema de combustibles fósiles como carbón y/o gas natural.

Otras emisiones que surgen de estas actividades por combustión y como emisiones fugitivas, o por escape sin combustión, no fueron incluidas en el inventario, dado que no hay presencia de grandes explotaciones de petróleo y carbón.

Finalmente, para el sector de energía se estima emisiones por quema de combustibles fósiles en el subsector de: i) consumo residencial y ii) sector de transporte. Otras fuentes de emisión como procesamiento de alimentos, bebidas y tabaco, consumo de combustibles a nivel comercial e institucional; y en sector por actividades estacionarias, no lograron ser estimadas ya que no se contó con la información suficiente para desarrollar el cálculo. En cuanto a las emisiones del sector de transporte, el municipio contaba con el inventario del parque automotor, y de datos nacionales se tomó cifras de kilómetros recorridos en promedio por modo de transporte y consumo promedio de gasolina.



Figura 1. Fuentes de emisión tenidas en cuenta para el sector energía.

Los resultados indican que en el sector de energía, el transporte emite el 74% de las emisiones estimadas (Figura 2) con un total de 38 Gg de CO<sub>2</sub> eq (Tabla 2). El gas predominante es ampliamente el CO<sub>2</sub>; el CH<sub>4</sub> y el N<sub>2</sub>O no son representativos en el sector.

Emisiones Sector Energía (Gg de CO<sub>2</sub> eq)

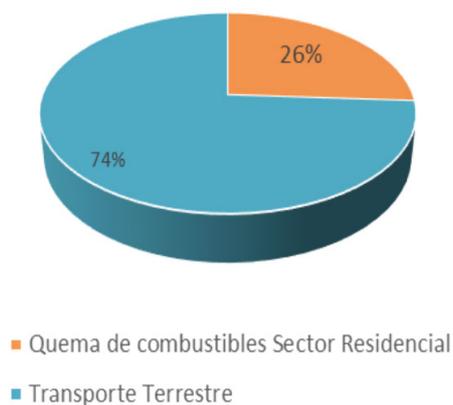


Figura 2. Emisiones sector energía.

Tabla 2. Resultados emisiones sector energía

Sector		Emisiones de GEI (Gg)			
4	Energía	CO2	CH4	N2O	CO2 eq
1.A.4.b	Quema de combustibles Sector Residencial	13	0.0011941	0.0000239	13.43
1A3b	Transporte Terrestre	37.39	0.02	0.00	38.30
	1A3bi Automóviles	8.46	0.004	0.000	8.67
	1A3bii Camiones para servicio ligero	3.05	0.001	0.000	3.13
	1A3biii Camiones para servicio pesado y autobuses	0.46	0.000	0.000	0.47
	1A3biv Motocicletas	25.41	0.012	0.001	26.03
	<b>Total sector energía</b>	<b>50.78</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>51.73</b>

### 3.2 Procesos industriales

El sector industrial de esta región es limitado en cuanto a información generada. Pocas industrias son reportadas por los actores claves como grandes generadores. En un inicio se tomó en cuenta industrias

de canteras y ladrilleras, uso de solventes, uso de parafina, y la industria de alimentos y bebidas. Se realizó un esfuerzo en consolidar la información mínima requerida para la estimación de emisiones de GEI por estas fuentes, pero dada la complejidad de cada proceso industrial y la poca información que reporta el sector y las entidades que las supervisan, no fue posible estimar emisiones para este sector. Otras fuentes como la industria química no son desarrolladas en la región, como tampoco la industria de metales.

### 4.3 Agricultura

Las emisiones provenientes de la ganadería, contemplan emisiones directas de metano y de óxido nitroso. Como principal categoría se tiene las emisiones de metano por fermentación entérica; inicialmente se había propuesto usar el nivel (TIER) 2 para las emisiones por fermentación entérica de la especie de bovino, ya que por comunicaciones anteriores se reporta como la categoría más emisora de metano, pero, al ser un primer ejercicio a una escala municipal, las directrices del IPCC proponen hacer todos los cálculos con nivel metodológico TIER 1, generando la primera línea base que servirá como soporte, tanto metodológico como de cuantificaciones futuras que servirán de comparación para inventarios futuros. En la Figura 3 se presenta las categorías del sector y las que fueron objeto de estudio en el presente inventario.

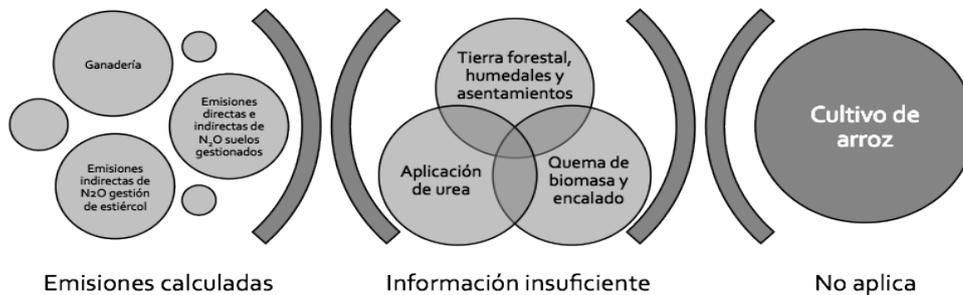


Figura 3. Fuentes tenidas en cuenta para el sector agricultura.

Los resultados mostraron que el sector agrícola genera 120 Gg de CO<sub>2</sub>, del cual el 40% de las emisiones lo hacen los suelos agrícolas, seguido de un 35% debido a fermentación entérica y un 25% debido al manejo de estiércol (Figura 4).

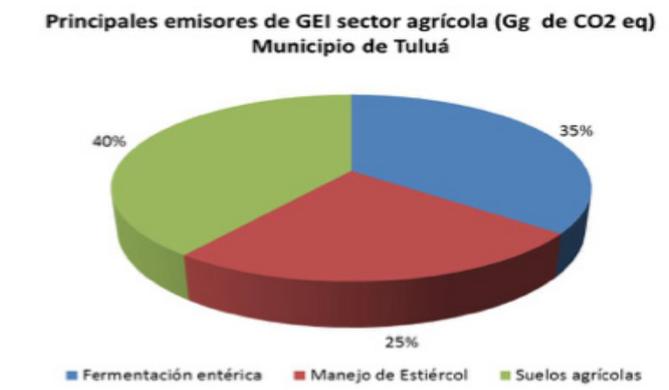


Figura 4. Principales emisiones de GEI sector agrícola.

### 3.4 Residuos

Para el sector de Residuos se estimó emisiones generadas por la descomposición de residuos sólidos dispuestos en tierra y tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas. Otras categorías como incineración de residuos y tratamiento biológico no fueron contempladas, debido a que son actividades que no cuentan con datos de actividad suficiente para la estimación de emisiones de GEI.



Figura 5. Fuentes tenidas en cuenta para el sector residuos.

Los resultados mostraron que el sector Residuos genera aproximadamente 35 Gg de CO<sub>2</sub> equivalente (Tabla 3), del cual el 94% de las emisiones proviene de la eliminación de desechos sólidos, seguido de un 9% debido al tratamiento y eliminación de aguas residuales domésticas (Figura 6).

Tabla 3. Emisiones de GEI en el sector residuos

Sector		Emisiones de GEI (Gg)			
		CO2	CH4	N2O	CO2 eq
4	<b>Residuos</b>				
4.A	Eliminación de Desechos Solidos		1.6		35
4.D	Tratamiento y eliminación de aguas de aguas residuales domesticas		0.003	0.007	2.178



Figura 6. Principales emisiones de GEI sector agrícola.

### 3.5 Consolidado de emisiones GEI municipio Tuluá, año 2010

El total de emisiones generadas en el municipio de Tuluá, Valle del Cauca para el año 2010, fue de 208.7 Gg de CO<sub>2</sub> Eq (Tabla 4); es decir, 208681 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Vale aclarar que estos datos pueden tener una incertidumbre de media a alta, dada la naturaleza de los datos de actividad y los factores de emisión, los cuales fueron seleccionados por defecto del IPCC.

Tabla 4. Consolidado resultado de Emisiones de GEI, Municipio de Tuluá año 2010. Datos en Gg.

CODIGO	SECTOR	CO2	CH4	NO2	CO2 eq	Porcentaje de participación con respecto al total
1	<b>ENERGIA</b>					
1.A.4.b	Quema de combustibles Sector Residencial	13.4	0.0	0.0	13.43	6.44
1A3b	Transporte Terrestre	37.39	0.02	0.00	38.30	18.35
3	<b>AGRICULTURA</b>				0.00	
3A	<b>GANADERIA</b>					
3A1	Fermentación entérica		2.04		42.84	20.53
3A2	Gestión de Estiércol		0.04	0.093	29.67	14.22
3C	Fuentes agregadas y emisiones de no CO2 provenientes de la tierra			0.154	47.74	22.88
4	<b>RESIDUOS</b>					
4.A	Eliminación de Desechos Solidos		1.64		34.53	16.55
4.D	Tratamiento y eliminación de aguas de aguas residuales domesticas		0.002	0.006	2.18	1.04
	<b>TOTAL</b>				208.68	100.00

### 3.6 Comparación de las emisiones de GEI Tuluá con emisiones nacionales

A nivel nacional, el inventario nacional de gases de efecto invernadero de la tercera comunicación nacional de cambio climático de IDEAM, indica una cifra preliminar de 212000 Gg CO<sub>2</sub> eq aproximadamente. Los cálculos de emisiones arrojaron que el sector con mayor cantidad de emisiones en el municipio fue el de Agricultura, con un 58%. De esta manera se demuestra las necesidades de trabajar en herramientas que brinden medidas de mitigación, que permitan establecer mecanismos, actividades y procesos de agricultura sostenible.

Los datos por subsectores para Tuluá, en comparación con los niveles nacionales, demuestran el bajo aporte del municipio (Figura 7) que alcanzan valores por debajo del 0.4% de las emisiones nacionales, situación que brinda metas alcanzables para lograr la meta de carbono neutral para el municipio de Tuluá.

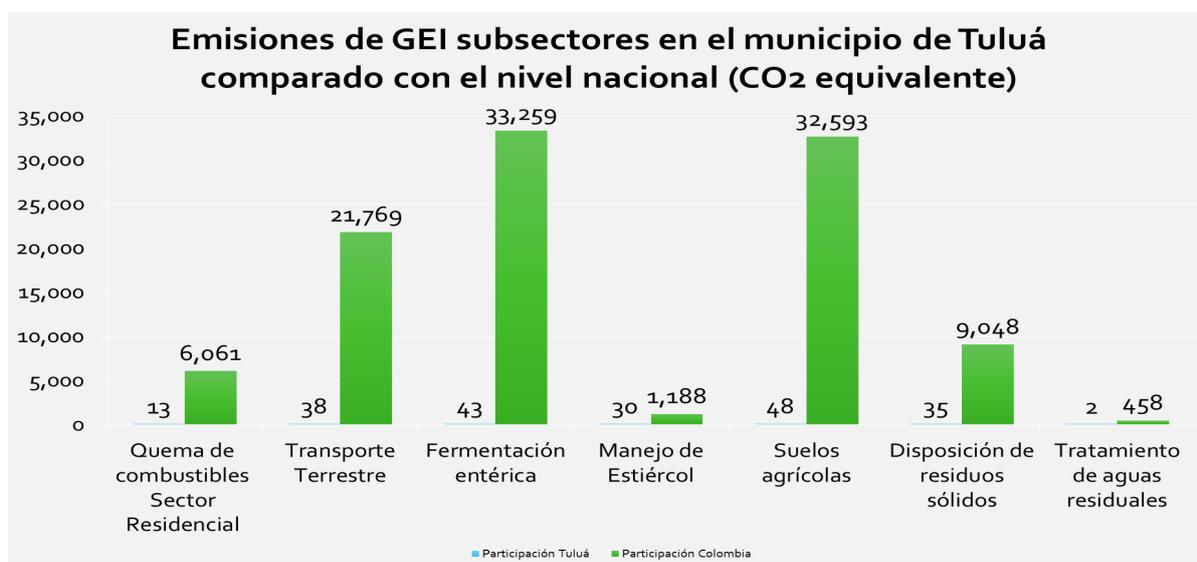


Figura 7. Emisiones de GEI por subsectores en el municipio de Tuluá, comparadas con el nivel nacional (CO<sub>2</sub> Eq.)

### 3.7 Relación de Emisiones de GEI respecto a Población y Producto Interno Bruto

Los datos de emisiones en función de la cantidad de habitantes del municipio arrojan como resultado la generación de 1.1 Ton de CO<sub>2</sub> eq por habitante al año. En comparación con la cifra nacional de 4.2, el dato es muy significativo ya que representa el 25% del consolidado nacional.

Tabla 5. CO<sub>2</sub> equivalente por habitante al año

Entidad territorial	Población	Emisiones (Gg CO <sub>2</sub> eq)	Ton CO <sub>2</sub> eq/Hab
TULUÁ	193,002	208	1.07
COLOMBIA	42,888,590	180.008	4.19

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Dirección de Censos y Demografía, grupo de proyecciones ([www.dane.gov.co](http://www.dane.gov.co))

Con respecto al producto interno bruto (PIB) del municipio, se puede interpretar que por 1 millón de pesos adicional en la economía, se produce 0.09 Ton de CO<sub>2</sub> eq (Tabla 6).

Tabla 6. Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por millón de pesos

Entidad territorial	PIB* (miles de millones de \$)	Emisiones (Gg CO <sub>2</sub> eq)	Ton CO <sub>2</sub> eq/ millon de pesos
TULUÁ / 2010	2.128	208	0.09
COLOMBIA / 2005	307.762	180.008	0.58

\* a precios corrientes de 2004

Fuente: DANE. 2004. Diseño DSO Dirección de Síntesis y Cuentas Nacionales –DSCN-. Metodología para calcular el Indicador de Importancia Económica Municipal Cuentas Departamentales – CD-.

## 4. Conclusiones

Al ser un primer ejercicio de cuantificación de gases de efecto de invernadero en escala municipal, se tiene un primer panorama de las emisiones por sectores y su participación en el mismo.

Dentro del sector de energía, la categoría de quema de combustibles fósiles a nivel residencial genera el 25% de las emisiones del sector y el 6,4% del total de las emisiones generadas en el municipio. Esto, sólo teniendo en cuenta el consumo residencial de gas natural.

Las emisiones del sector de transporte son la tercera fuente de emisión más importante en el municipio, con una participación del 18% y la más importante del sector energético, con el 75% de participación.

Para lograr estimar emisiones de GEI generadas por el sector industrial, se debe hacer un mayor seguimiento y control a las actividades que este sector genera. Actividades como la industria de canteras y ladrilleras, uso de solventes, uso de parafina, y la industria de alimentos y bebidas, son actividades que claramente generan una emisión de GEI pero que dada la carencia de información, no se logró estimar.

La eliminación de residuos sólidos hoy en día es uno de los problemas ambientales más frecuentes en los territorios. Esta actividad se encuentra en la lista de categorías clave del inventario, lo que indica que causa un impacto significativo en cuanto a la generación de emisiones. Representa el 6.4 de las emisiones totales y es la categoría principal en el sector de residuos con el 94% de las emisiones, seguido del 6% de emisiones por el tratamiento de agua residual doméstica.

Al igual que inventarios nacionales, la fermentación entérica tiene un gran porcentaje de participación dentro de las estimaciones municipales, con un 20.53% para Tuluá. Es importante recalcar que la gestión del estiércol es también un ítem importante, especialmente cuando el óxido nitroso tiene un potencial de calentamiento de 310, razón por la cual las acciones de mitigación deben priorizar estas emisiones.

Sumando las emisiones de ganadería y las de fermentación entérica, se tiene una participación del 43.41%, porcentaje coherente con la vocación del municipio y un punto focal y específico para políticas de disminución de emisiones, máxime cuando un gran porcentaje de los municipios de Colombia tiene la misma actividad económica (Agropecuaria).

## Bibliografía

- Braatz, B. y Doorn, M. (s.f.). Manejo del Proceso de Elaboración del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Recuperado de: [http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008g\\_guia.pdf](http://www2.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008g_guia.pdf)
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). (2015). Inventario Municipal de Gases de Efecto Invernadero – IMGEl Tuluá. Recuperado de: <http://dapa.ciat.cgiar.org/inventario-municipal-de-gases-de-efecto-invernadero-imgei-tulua/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambios Climáticos (IPCC), Organización de Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) y Agencia Internacional de la Energía (AIE), 1997. Libro de Trabajo para el Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Reino Unido. Recuperado de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.html>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2000). Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Recuperado de: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>
- (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Japan. Recuperado de: [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/lulucf/gp/lulucf\\_files/GPG\\_LULUCF\\_FULL.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/lulucf/gp/lulucf_files/GPG_LULUCF_FULL.pdf)
- (2006). Draft 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/meetings/session25/doc4a4b/vol1.pdf>
- (2007). GHG Inventories. Recuperado de: [http://unfccc.int/resource/cd\\_roms/na1/ghg\\_inventories/index.htm](http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/index.htm)
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2010b). Capítulo 2: Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. pp: 119-152. En: IDEAM 2010. Segunda Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Municipio de Tuluá. (2011). Anuario Estadístico de Tuluá 2010. Tuluá, Valle del Cauca. Recuperado de: <http://tulua.gov.co/documentos.shtml>
- Yepes, A., Navarrete, D., Philips, J., Duque, Á., Cabrera, E., Galindo, G. et al. (2011). Estimación de las emisiones de dióxido de carbono generadas por deforestación durante el periodo 2005-2010. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM-. Bogotá D.C., Colombia. 32 pp.





# Diseño de procesos en Industria Láctea: Transformación de lactosuero

**Juan Sebastián Ramírez-Navas**

Ingeniero Químico, Universidad Central del Ecuador (EC)

Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle (CO)

Profesor Asistente DOMT, Grupo GIPAB, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Universidad del Valle

Profesor, Grupo GIASCA, Programa de Química, Universidad Santiago de Cali

[juan.sebastian.ramirez@correounivalle.edu.co](mailto:juan.sebastian.ramirez@correounivalle.edu.co)

## Resumen

El co-producto lactosuero es un derivado procedente de la fabricación quesera que ha sido considerado equívocamente como un desecho, por los problemas de contaminación ambiental que genera cuando es vertido en efluentes y suelos; sin embargo, en los últimos años se ha desarrollado una tecnología que se está utilizando para elaborar productos alimenticios de alta calidad a base de lactosuero, que suministra propiedades funcionales y nutritivas de alto valor a precios económicos, lo cual representa una alternativa para su aprovechamiento, transformándolo en un ingrediente con gran potencial dentro de la industria de alimentos.

**Palabras clave:** Lactosuero, aprovechamiento, procesos.

## 1. Introducción

El lactosuero es uno de los materiales más contaminantes que existen en la industria alimentaria. Su alto poder contaminante deriva de su elevado contenido en materia orgánica, siendo su riqueza en lactosa la principal responsable del mismo, debido a su capacidad para actuar como sustrato de fermentación microbiana (Castillo, Jordán, Abellán, Laencina y López, 1996). La Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) del suero lácteo varía entre 20.000 y 50.000 mg de  $O_2/L$  (Valencia y Ramírez, 2009). En otras palabras, cerca de 0,25 a 0,30 litros de suero sin depurar, equivalen a las aguas negras producidas en un día por una persona (Inda, 2000; Jelen, 2002). Por esta razón, gobiernos de varios países exigen a las industrias de derivados lácteos una producción limpia (López, Zuluaga, Herrera, Ruiz y Medina de Pérez, 2006). Las políticas gubernamentales son cada vez más estrictas al respecto (Chacón, 2004; Yang & Silva, 1995). Sin embargo, para Surh, Ward & McClements (2006) esta preocupación por la producción ecológica de los alimentos e ingredientes alimentarios puede ser una posible oportunidad para la revitalización de algunos procesos de transformación de lactosuero, abandonados en el pasado debido a la no viabilidad económica en comparación con la síntesis química directa o el uso de otros sustratos fermentables.

Considerando los componentes del suero por su valor tecnológico, nutricional, farmacológico, fisiológico, etc., esta “materia prima” adquiere potencial riqueza para la industria de derivados lácteos (Castillo et al., 1996; Chinappi & Sánchez, 2000). Esto motivó a cambiar su clasificación, y pasó de ser un “desecho” a ser un “co-producto”; de ahí la importancia de generar un portafolio de aplicaciones industriales, logrando evitar la contaminación medio ambiental y recuperando con creces el valor monetario de este producto.

Varios autores han reportado avances tecnológicos considerables que se realiza a escala comercial a fin de obtener una amplia gama de productos; varios de estos documentos son revisados en este trabajo.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Lactosuero

El lactosuero o suero de leche es un líquido claro, de color amarillo verdoso translúcido, o incluso, a veces, un poco azulado, pero el color depende de la calidad y el tipo de leche utilizada en su obtención. En el Codex-Alimentarius (1995) se define al suero como el fluido que se separa de la cuajada después de la coagulación de la leche, nata, leche desnatada o suero de mantequilla en la fabricación del queso, la caseína o productos similares.

Es el coproducto más abundante de la industria láctea, resultante después de la precipitación y la remoción de la caseína de leche durante de la elaboración del queso y en la fabricación de caseína. Es de difícil aceptación en el mercado, ya que sus características no lo hacen apto para su comercialización directa como suero líquido. Es un excelente medio de cultivo debido a sus propiedades y composición, y por ello se utiliza en gran número de procesos fermentativos (Castillo et al., 1996; González, 1996; Imbeault, 1997; Valencia, J. 2008; Panesar, Kennedy, Gandhi & Bunko, 2007).

### 2.2 Composición

La cantidad y composición del lactosuero es muy variable ya que depende de muchos factores: por ejemplo: 1) El tipo de queso (aproximadamente, 4L/kg de queso en quesos frescos y hasta 11,3 L/kg de queso para quesos madurados); 2) el tratamiento térmico de la cuajada que puede disminuir el porcentaje de proteína del suero resultante; 3) la forma de coagulación (ácida o enzimática); 4) el cuajo empleado (microbiano, quimosina o mezclas quimosina/pepsina), que aporta amargor residual al suero por inactivación incompleta de las enzimas proteolíticas (Mulvihill y Donovan, 1987).

Generalizando, la producción de queso da lugar a 9 kg de suero por 1 kg de queso, partiendo de 10 litros de leche. El lactosuero representa alrededor del 85-95% del volumen de la leche, retiene el 55% de los nutrientes de la leche (Becerra, 1999; Schaafsma, 2008; Singh, Sooch, Kamaljit Kaur & Kennedy, 2004), y contiene los componentes solubles de la leche. En el caso del queso fresco: 4,9% de lactosa, 0,9% de proteína, 0,6% de cenizas y 0,3% de grasas (Audic, Chaufer & Daufin, 2003; Sánchez, Ortiz y Betancourt, 2004). De 6 a 7 g/Kg de proteínas del lactosuero se dividen en, aproximadamente: 55 – 65%  $\alpha$ -lactoglobulina, 15 – 25%  $\beta$ -lactoalbúmina, 10 – 15% inmunoglobulinas, 5 – 6 % seroalbúmina, 10 – 20 % proteosomas-peptonas, una pequeña cantidad de caseína soluble (1 – 2%), proteínas menores (<0,5%) y algunos péptidos.

### 2.3 Tipos de lactosuero

De acuerdo con el origen, el lactosuero se clasifica en: **Lactosuero dulce**, el cual es el líquido sobrante de la precipitación de las proteínas por hidrólisis específica de la k-caseína, por coagulación enzimática, con pH próximo al de la leche inicial y sin variación de la composición mineral. El **Lactosuero ácido**, líquido sobrante obtenido después de la coagulación ácida o láctica de la caseína; presenta un pH cercano a 4,5 debido a la producción de ácido láctico y alto contenido de minerales (más del 80% de los minerales de la leche de partida).

### 2.4 Aprovechamiento industrial

El lactosuero es un producto rico en nutrientes; por ejemplo, 1.000 litros de lactosuero contienen más de 9 kg de proteína de alto valor biológico, 50 kg de lactosa y 3 kg de grasa de leche. Esto equivale a los requerimientos diarios de proteína de cerca de 130 personas y a los requerimientos diarios de energía de más de 100 personas (Inda, 2000). Lamentablemente, en la mayoría de las fábricas queseras en Latinoamérica, una pequeña cantidad de lactosuero es empleada para alimentar cerdos o terneros, y el resto es vertido a efluentes, originando la contaminación del suelo y el medio ambiente. No usar el lactosuero como alimento es un enorme desperdicio de nutrimentos. Recientemente se ha tomado conciencia de su importancia por su elevado valor nutricional, tanto para el hombre como para el ganado (Abaigar, 1982).

El lactosuero contiene más de la mitad de los sólidos presentes en la leche, convirtiéndolo en una rica fuente de nutrientes. Se le ha atribuido diversas propiedades; entre ellas: depurativo, desintoxicante, regenerador de la flora intestinal y potenciador del sistema inmune. Adicionalmente, se considera que utilizarlo fresco aporta al organismo nutrientes básicos para el equilibrio metabólico. Es el medio más suave y al mismo tiempo más eficaz para mejorar el flujo libre de la bilis, la evacuación de las deposiciones y el vaciamiento de la vejiga.

El lactosuero y sus derivados son ingredientes que están ganando cada vez más terreno en diferentes áreas de la industria de alimentos. Se ha realizado varios trabajos con el fin de encontrar alternativas de uso; se ha estudiado su composición y se ha encontrado una gran cantidad de péptidos bioactivos derivados de las proteínas que contiene. Modler (1987) comenta que la elaboración de productos a base de suero lácteo representan un área en crecimiento dentro de la industria láctea. Baró, Jiménez, Martínez-Ferez y Bouza (2001) informan que el lactosuero representa una rica y variada mezcla de proteínas secretadas que poseen un amplio rango de propiedades químicas, físicas y funcionales, que no sólo representan un importante papel nutritivo como una rica y balanceada fuente de aminoácidos, sino que además, en muchos casos, parecen ejercer determinados efectos biológicos y fisiológicos, *in vivo*.

El mercado de los productos a base de lactosuero tuvo un incremento del 12% desde 1995; no obstante, la demanda de estos productos no ha sido suplida (Posada, Terán, y Ramírez-Navas, 2011).

La adecuada modificación de proteínas de lactosuero, sobre todo la microparticulación, permite obtener una variedad de productos de alto valor agregado, utilizados principalmente como reemplazantes de la grasa y, en un menor grado, para solucionar algún requerimiento en propiedades organolépticas y/o de textura de un alimento; pero su principal utilidad es nutricional, ya que no aportan colesterol, a diferencia de las grasas (López et al., 2006).

La producción de péptidos a partir de la hidrólisis enzimática de las proteínas de lactosuero amplía la posibilidad de aplicaciones, sobre todo en el área de alimentos funcionales (nutracéuticos). Algunos ejemplos de éstos son: galacto-oligosacáridos, lactulosa, lactitol, ácido lactobiónico, lactosucrosa, lactoferrina, lactoferricina (Silva y Verdalet, 2003), que ocasionan acciones antimicrobianas, disminución de la presión arterial y actividad antitumoral, como algunas de las propiedades atribuidas a estos productos obtenidos.

### 2.5 Fraccionamiento

El fraccionamiento (*cracking*) corresponde a la separación de segmentos individualizados de una materia original compleja. La separación de fracciones individuales purificadas de alto valor añadido (lactoalbúmina, lactoglobulina, inmunoglobulinas, lactoferrina, lactoperoxidasa, lactosa, etc.) ha sido posible por la puesta en marcha de sofisticados procedimientos de fraccionamiento y de extracción, usando técnicas separativas tales como microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF),

osmosis inversa (OI), diafiltración (DF), electrodiálisis y cromatografía, asociadas o no, a tratamientos químicos (Berruga, 1999). Se puede realizar el fraccionamiento combinado con transformación por vía enzimática sobre un reactor de membrana.

Para llevar a cabo los procesos de obtención de diversos productos basados en la fermentación del lactosuero, es conveniente realizar un fraccionamiento previo total o parcial, con el fin de extraer y/o concentrar los componentes a ser utilizados como sustrato. El fraccionamiento convierte al lactosuero en una materia prima útil, logrando lactosueros desproteinizados, desmineralizados, y con altas concentraciones de lactosa.

Surh et al. (2006) reportan que la tecnología ha avanzado con el fin de adaptar correctamente los procesos, convirtiendo a la lactosa proveniente del lactosuero en un sustrato útil para la fermentación microbiana. Valencia, J. (2008) informa que se ha realizado varios intentos con el fin de acondicionar el lactosuero para la fermentación: 1) hidrólisis de sus proteínas, logrando obtener una fuente de nitrógeno adecuado para promover el crecimiento, y eliminar o reducir la necesidad de costosos suplementos; 2) desmineralizado, que favorece solamente a algunas levaduras; 3) hidrólisis de la lactosa, por ser difícilmente fermentable, pero esto aumenta los costos de proceso, etc.

## 2.6 Proteínas

Entre los derivados de suero se puede citar, a manera de ejemplo: lactosuero en polvo, proteínas aisladas de suero WPI (*Whey Protein Isolates*), proteínas concentradas de suero WPC (*Whey Protein Concentrates*), suero deslactosado en polvo, suero desmineralizado y deslactosado en polvo, lactoalbúmina en polvo, suero permeado WP (*Whey Permeate*), entre otros.

Los WPC son derivados de la ultrafiltración del suero y contienen entre 20% y 89% de proteína, siendo el WPC con 35% el producto más común (Meza, Verdini & Rubiolo, 2010). Por el contrario, los WPI presentan un contenido proteico superior al 90%, el cual sólo puede ser alcanzado con la disminución de la grasa y del contenido de minerales, mediante etapas extras a la UF en su fabricación, como son la MF y la DF respectivamente. En el mercado de las proteínas también está ganando importancia una nueva generación de proteínas de suero texturizadas WPT (*Whey Protein Texturizer*), que presentan la capacidad de gelificar en frío y de formar soluciones altamente viscosas junto a unas mejoradas cualidades emulsificantes, lo que permite su uso para la elaboración de numerosos productos tales como surimi<sup>1</sup>, mayonesa, salsas, queso de untar, productos cárnicos prensados, patatas fritas, croquetas, productos de panadería e incluso cosméticos (Burgarella, Lanier y Hamann, 1985; Castillo et al., 1996; Marshall, 1982; D. M. Mulvihill y Donovan. M., 1987).

Debido a la composición, las propiedades funcionales del WPI son superiores a las del WPC, por lo que éste puede ser incluido en productos bajos en grasa, deslactosados, fórmulas médicas, fórmulas infantiles y para deportistas, entre otros. Sin embargo, las ventajas de emplear WPC son económicas y sensoriales (Lucena, Álvarez, Menéndez, Riera, y Alvarez, R. 2007; Surh et al., 2006). Mortenson, Vickers & Reineccius (2008), al evaluar sensorialmente el sabor del WPI y WPC, demostraron que éste último obtuvo mayores calificaciones, por ser más dulce y tener mayor sabor lácteo; además observaron que existe mayor cantidad de moléculas volátiles relacionadas con el aroma en los WPC que en los WPI.

En cuanto al empleo de las proteínas lácteas, el primer trabajo que propuso reemplazar una porción (25%) de los sólidos lácteos no grasos por sólidos de suero en polvo en helados, fue el realizado por Leighton en 1944, impulsado principalmente por el ahorro de costos, sin obtener cambios negativos en el sabor y textura, siendo desde entonces la porción de referencia durante muchos años (Goff, 2008).

Las propiedades de las WPC han permitido su aplicación industrial en postres de yogurt, postres de leche para untar, postres de crema (análogos a la crema de leche), crema batida, flanes, natillas, mousses (espumas), pudines y formulaciones para helados (Buriti, Castro & Saad, 2010; Philippopoulos & Papadakis, 2001).

Varios ingredientes lácteos han sido incorporados dentro de formulaciones de postres y productos de confitería como fuente de proteína, importante para llevar a cabo la reacción de Maillard con los azúcares. En Estados Unidos se utiliza hasta el 3% de lactosuero dulce en polvo en productos de confitería. Entre los productos derivados del lactosuero más utilizados por la industria confitera se encuentra: suero dulce en polvo, WPC, WPI y WPT (Ahmed, Ramaswamy & Pandey, 2006; Damodaran & Paraf, 1997; Hugunin, 1999; Webb, 1966).

<sup>1</sup> El surimi llamado Kamaboko (蒲鉾, Kamaboko) es un ingrediente común de la gastronomía japonesa, en particular en sopas de fideos como el Udon

El suero en polvo desmineralizado, las WPC y WPI parcialmente desnaturizadas en combinación con otros agentes aireantes (gelatina y productos de soya) permiten la formación de burbujas de aire en productos aireados de confitería (como las esferas de cebada malteada recubiertas de chocolate, turrone, etc.), pero se requiere como mínimo un contenido proteico de 10% en el suero, para evitar que la textura colapse después del proceso de vacío. Adicionalmente, las WPI, parcialmente hidrolizadas, han probado proveer una importante funcionalidad. (Bouzas, 1999).

Las WPC proveen una alternativa económica efectiva en la elaboración de caramelos con buenas cualidades, ya que estos ingredientes son menos costosos que la leche descremada; además permiten mantener excelentes condiciones de proceso. Sin embargo, en algunas aplicaciones, las WPC son añadidas con otros ingredientes lácteos; por ejemplo, en dulces de leche puede ser añadidas junto con lactosuero bajo en minerales, obteniendo un control del sabor salado, de los cristales de lactosa y los problemas de textura pegajosa. En los caramelos *stand-up* se agrega una mínima cantidad de caseína (caseinatos hidrolizados) además de las WPC, para evitar la alteración de las propiedades de flujo a baja temperatura (Ahmed et al., 2006; Bouzas, 1999; Hugunin, 1999).

De igual manera, las propiedades funcionales y nutricionales de las proteínas de suero han sido aplicadas en la fabricación de barras nutricionales, en particular los ingredientes con alto contenido de proteína como WPC80 y WPI, los cuales ofrecen textura suave y sabores lácteos preferidos por los consumidores, en comparación con los sabores de otras fuentes de proteína como la soya. Además, las barras hechas con proteínas lácteas, especialmente WPI, son más flexibles y moderadamente firmes. (Bouzas, 1999).

## 2.7 Lactosa

El componente mayoritario del suero es la lactosa, que por sus propiedades de solubilidad en agua, poder edulcorante, reducida higroscopicidad y aporte nutritivo, tiene amplios usos como: excipiente farmacéutico, leches maternizadas, para aumentar el contenido en lactosa, como fuente de E-S sin aumentar en exceso la dulzura del alimento; en industria alimentaria, como soporte de salsas y sopas y en chocolatería; en industria química, en la fabricación de espumas de poliuretano. En la alimentación infantil la lactosa constituye una fuente de galactosa, azúcar que entra a formar parte en los cerebrósidos, lípidos presentes en gran cantidad en el tejido nervioso (Ramírez-Navas, 2009).

La valorización de este componente puede hacerse por varias vías: extracción de la lactosa, hidrólisis de la lactosa y utilización de la lactosa como sustrato para la fermentación microbiana. En ambos casos esta valorización puede hacerse directamente a partir del suero, pero sin embargo los resultados se ven mejorados con la utilización de sueros desproteinizados (Castillo et al., 1996).

La lactosa puede extraerse mediante un proceso de concentración, seguido de cristalización y separación de los cristales por centrifugación, o bien mediante combinación de UF y OI. Desde el punto de vista funcional, la lactosa presenta cierto poder edulcorante, capacidad de fijación de aromas y de adsorción de pigmentos, capacidad caramelizante, poder emulsificante y agregante. La última propiedad mencionada permite la utilización de la lactosa en la industria farmacéutica para la elaboración de píldoras y grageas y como un importante ingrediente en la industria de confitería (Veisseyre, 1988).

La sofisticación conseguida por los productores de lactosa alimentaria y refinada de los países occidentales les ha hecho conseguir una buena posición en el mercado de productos derivados del suero, convirtiéndose en el producto más importante en cantidad consumida por detrás del suero en polvo.

## 2.8 Fermentación

Para llevar a cabo los procesos de obtención de diversos productos basados en la fermentación del lactosuero, es conveniente realizar un fraccionamiento previo total o parcial, con el fin de extraer y/o concentrar los componentes a ser utilizados como sustrato. El fraccionamiento convierte al lactosuero en una materia prima útil, logrando lactosueros desproteinizados, desmineralizados, y con altas concentraciones de lactosa.

Surh et al. (2006) reportan que la tecnología ha avanzado con el fin de adaptar correctamente los procesos convirtiendo a la lactosa proveniente del lactosuero en un sustrato útil para la fermentación microbiana. Valencia, J. (2008) informa que el lactosuero debe ser acondicionado antes de la fermentación, realizando

una o varias de las siguientes actividades: 1) hidrólisis de sus proteínas, logrando obtener una fuente de nitrógeno adecuado para promover el crecimiento, y eliminar o reducir la necesidad de suplementos costosos; 2) desmineralizado, que favorece solamente a algunas levaduras; 3) hidrólisis de la lactosa, por ser difícilmente fermentable, pero esto aumenta los costos de proceso, etc.

La fermentación del lactosuero, uno de los procesos que ha permitido valorizar este co-producto, es una interesante área de investigación para la industria láctea (Valencia, J. 2008), que provee diversas posibilidades de transformación, principalmente del lactosuero permeado. El lactosuero posee todos los macro y micronutrientes y elementos traza que los microorganismos (M.O.) necesitan para realizar el proceso fermentativo. El componente más utilizado en estos procesos es la lactosa. El proceso comienza con la extracción o concentración de la lactosa por alguna de las técnicas del fraccionamiento; a continuación, generalmente, se realiza la hidrólisis de ésta, total o parcial, dependiendo del tipo de fermentación microbiana y el producto a obtener. Con la hidrólisis de la lactosa se logra incrementar notablemente el número de bioproductos (Becerra, 1999).

De acuerdo con Valencia, J. (2008), el lactosuero no es siempre una buena materia prima para la industria de fermentación debido a los inconvenientes económicos. El lactosuero y, principalmente, el desproteínizado, no es una buena fuente de nitrógeno orgánico, necesario para el crecimiento de muchos microorganismos industriales. Para lograr crecimientos microbianos satisfactorios es conveniente suplementarlo y esto implica un costo adicional. Aun así, se ha realizado varios trabajos con células inmovilizadas que han logrado alta productividad, incluso en lactosuero desproteínizado, debido a su alta densidad celular y reducida necesidad de crecimiento (Ramírez-Navas, 2013).

Se puede obtener una amplia gama de productos a partir de la fermentación de lactosuero (Valencia, J. 2008), usándolo preferiblemente desproteínizado y suplementado. Productos tales como, ácidos grasos, ácidos orgánicos, alcoholes, bacteriocinas, bebidas, biomasa, biogases, biopolímeros, enzimas, insecticidas, solventes, tensoactivos, vitaminas y otros (Castillo et al., 1996; Schaafsma, 2008; Young, 2007) pertenecen a esta gama que a futuro se incrementará, debido los avances en Ingeniería Genética.

### 3. Conclusiones

El co-producto lactosuero tiene alto poder contaminante, por lo tanto no debe ser desechado, sino utilizado. Éste es una fuente rica en nutrientes. No utilizarlo es el peor error que se puede cometer en la industria láctea. El lactosuero puede ser aprovechado de diversas maneras; todo está en la imaginación del investigador.

El lactosuero presenta un interesante panorama para la industria de extracción y transformación debido al valor de sus componentes. Las posibilidades de obtener derivados a partir de él son numerosas, desde sus componentes originales como lactosa, proteínas, grasas y minerales, hasta nuevos productos a partir de la aplicación de bioquímicas.

## Bibliografía

- Abaigar, A. (1982). El lactosuero en la alimentación del ganado porcino. *ITG ganadero*. Recuperado de: [www.itgganadero.com/itg/portal/documentos2.asp?id=43&d=1](http://www.itgganadero.com/itg/portal/documentos2.asp?id=43&d=1)
- Ahmed, J., Ramaswamy, H. & Pandey, P. (2006). Dynamic rheological and thermal characteristics of caramels. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 216-224. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643805000186>
- Audic, J., Chaufer, B. & Daufin, G. (2003). Non-food applications of milk components and dairy co-products: A review. Francia: *Le Lait*, 83(6), 417-438.
- Baró, L., Jiménez, J., Martínez-Ferez, A. y Bouza, J. (2001). Péptidos y proteínas de la leche con propiedades funcionales. Facultad de Farmacia. Universidad de Granada, España: *Ars Pharmaceutica*, 42(3-4), 135-145.
- Becerra, M. (1999). *Secreción de la  $\beta$ -galactosidasa de Kluyveromyces Lactis*. Coruña, España: Universidade da Coruña. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2183/12372>
- Berruga, M. (1999). *Desarrollo de procedimientos para el tratamiento de efluentes de quesería*. (Tesis Doctoral). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Bouzas, J. (1999). *Whey Products and Lactose in Confectionery Applications*. Applications Monograph. Confectionery. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.497.9667&rep=rep1&type=pdf>
- Burgarella, J., Lanier, T. & Hamann, D. (1985). Effects of added egg white or whey protein concentrate on thermal transition in Rigidity of Croaker Surimi. *Journal of Food Science*, 50, 1588-1594, 1606.
- Buriti, F. C. A., Castro, I. A., & Saad, S. M. I. (2010). Effects of refrigeration, freezing and replacement of milk fat by inulin and whey protein concentrate on texture profile and sensory acceptance of synbiotic guava mousses. *Food Chemistry*, 123(4), 1190-1197. Recuperado de: <http://www.producao.usp.br/handle/BDPI/19465>
- Castillo, M., Jordán, M., Abellán, A., Laencina, J. y López, M. (1996). Tecnología de aprovechamiento de lactosuero. *Revista española de lechería*, 74, 24-30.
- Chacón, A. (2004). Perspectivas actuales de la proteína unicelular (SCP) en la agricultura y la industria. *Agronomía Mesoamericana*, 15(1), 93-106.
- Chinappi, I. & Sánchez, J. (2000). Producción de biomasa de *Kluyveromyces fragilis* en suero de leche desproteinizado. *Acta Científica Venezolana*, 51(4), 223-230. Recuperado de: [http://www.cdc.fonacit.gob.ve/cgi-win/be\\_alex.exe?Acceso=T052100010667/1&Nombrebd=fonacit](http://www.cdc.fonacit.gob.ve/cgi-win/be_alex.exe?Acceso=T052100010667/1&Nombrebd=fonacit)
- Codex-Alimentarius. International Food Standards. (1995). General Standard for Food Additives CODEX STAN (Vol. 192-1995). Recuperado de: [http://www.codexalimentarius.net/gfsaonline/docs/CXS\\_192e.pdf](http://www.codexalimentarius.net/gfsaonline/docs/CXS_192e.pdf)
- Damodaran, S. & Paraf, A. (1997). Food Proteins and their Applications. Recuperado de: <http://avxsearch.se/?q=Food%20proteins%20and%20their%20applications>
- Goff, H. (2008). 65 Years of ice cream science. *International Dairy Journal*, 18(7), 754-758. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694608000484>
- González, M. (1996). The biotechnological utilization of cheese whey: a review. *Bioresource Technology*, 57(1). Recuperado de: <http://www.ingentaconnect.com/content/els/09608524/1996/00000057/00000001/art00036>
- Huginin, A. (1999). El lactosuero: aplicaciones de productos de lactosuero en Estados Unidos y posibles aplicaciones en México y otros países latinoamericanos. *Industria Alimenticia*, 5, 44-50. Recuperado de: [http://medvplnx001/pmb/opac\\_css/index.php?lvl=notice\\_display&id=4485](http://medvplnx001/pmb/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=4485)
- Imbeault, N. (1997). *Production d'acides gras par biodégradation anaerobique du perméat de lactosérum dans un bioréacteur en continu*. Maîtrise en Ressources Renouvelables, Université du Québec, Québec, Canada. Recuperado de : <http://constellation.uqac.ca/1068/>

- Inda, A. (2000). Queso. México: Organización de los Estados Americanos, OEA.
- Jelen, P. (2002). Whey processing—Utilization and products. En H. Roginski (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences* (pp. 2739-2745). Oxford: Elsevier.
- López, C., Zuluaga, A., Herrera, S., Ruiz, A., & Medina de Pérez, V. I. (2006). Producción de ácido cítrico con *Aspergillus niger* a partir de suero de leche. *DYNA*, 73(150), 39-57. Medellín, Colombia. Recuperado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532006000300004](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000300004)
- Lucena, M., Álvarez, S., Menéndez, C., Riera, F. & Álvarez, R. (2007). [alpha]-Lactalbumin precipitation from commercial whey protein concentrates. *Separation and Purification Technology*, 52(3), 446-453. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586606001894>
- Marshall, K. (1982). Industrial isolation of milk proteins: whey protein. En P. F. Fox (Ed.), *Developments in Dairy Chemistry. L. Proteins*. (pp. 339-373). London: Applied Science Publishers Ltd.
- Meza, B., Verdini, R. & Rubiolo, A. (2010). Effect of freezing on the viscoelastic behaviour of whey protein concentrate suspensions. *Food Hydrocolloids*, 24(4), 414-423. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/0268005X/24/4>
- Modler, H. (1987). The use of whey as animal feed and fertilizer. *IDF Bulletin*, 212, 11-124. *International Dairy Federation*, Brussels, Belgium.
- Mortenson, M., Vickers, Z. & Reineccius, G. (2008). Flavor of whey protein concentrates and isolates. *International Dairy Journal*, 18(6), 649-657. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958694607002488>
- Mulvihill, D. & Donovan, M. (1987). Whey Proteins and Their Thermal Denaturation - A Review. *Irish Journal of Food Science and Technology*, 11(1), 43-75
- Panesar, P., Kennedy, J., Gandhi, D. & Bunko, K. (2007). Bioutilisation of whey for lactic acid production. *Food Chemistry*, 105(1), 1-14. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03088146/105/1>
- Philippopoulos, C. & Papadakis, M. (2001). Current trends in whey processing and utilization in Greece. *International Journal of Dairy Technology*, 54(1), 14-19. Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1471-0307.2001.00007.x/full>
- Posada, K., Terán, D. y Ramírez-Navas, J. (2011). Empleo de lactosuero y sus componentes en la elaboración de postres y productos de confitería. Buenos Aires, Argentina: *La Alimentación Latinoamericana*, 292, pp. 66-75.
- Ramírez-Navas, J. (2009). Aprovechamiento Industrial de Lactosuero. XV Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química - XV COLAEIQ, San Salvador, El Salvador.
- (2013). Uso de la fermentación para el aprovechamiento del lactosuero. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 77, 52-61.
- Sánchez, Ó., Ortiz, M. y Betancourt, A. (2004). Obtención de ácido cítrico a partir de suero de leche por fermentación con *Aspergillus* spp. Colombia: *Revista Colombiana de Biotecnología*, VI(1), 43-54.
- Schaafsma, G. (2008). Lactose and lactose derivatives as bioactive ingredients in human nutrition. *International Dairy Journal*, 18(5), 458-465.
- Silva, E. y Verdalet, I. (2003). Revisión: alimentos e ingredientes funcionales derivados de la leche. Caracas, Venezuela: *ALAN*, 53(4), 333-347.
- Singh, R., Sook, B., Kaur, K. & Kennedy, J. (2004). Optimization of parameters for citric acid production from cheddar cheese whey using *Metschnikowia pulcherrima* NCIM 3108. *Journal of Biological Sciences*, 4(6), 700-705.
- Surh, J., Ward, L. & McClements, J. (2006). Ability of conventional and nutritionally-modified whey protein concentrates to stabilize oil-in-water emulsions. *Food Research International*, 39(7), 761-771. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996906000081>

- Valencia, E. y Ramírez, M. (2009). La industria de la leche y la contaminación del agua. *Ciencia y Cultura, Elementos*, 73(16), 27 - 31.
- Valencia, J. (2008). El Suero de quesería y sus posibles aplicaciones (1 parte). México: *Mundo Lácteo y Cárnico*, 3-4(1), 4-6.
- (2008). El Suero de Quesería y sus Posibles Aplicaciones (Parte 2/3). *Mundo Lácteo y Cárnico*, Julio/Agosto, 16-18.
- Veisseyre, R. (1988). *Lactología técnica: composición, recogida, tratamiento y transformación de la leche*. España: Editorial Acribia.
- Webb, B. (1966). Whey - A Low-Cost Dairy Product for Use in Candy. *Journal of Dairy Science*, 49(10), 1310-1313. Recuperado de: <http://www.journalofdairyscience.org/article/S0022-0302%2866%2988081-5/abstract>
- Yang, S. & Silva, E. (1995). Novel products and new technologies for use of a familiar carbohydrate, milk lactose. *Journal of Dairy Science*, 78(11), 2541-2562.
- Young, S. (2007). Whey Products in Ice Cream and Frozen Dairy Desserts. U.S. Dairy, Export Council, Applications Monograph Ice Cream. Recuperado de: [http://www.thinkusadairy.org/Documents/Customer%20Site/C3-Using%20Dairy/C3.7-Resources%20and%20Insights/03-Application%20and%20Technical%20Materials/ICECREAM\\_ENG.pdf](http://www.thinkusadairy.org/Documents/Customer%20Site/C3-Using%20Dairy/C3.7-Resources%20and%20Insights/03-Application%20and%20Technical%20Materials/ICECREAM_ENG.pdf)



# Buenas Prácticas de Manufactura para alimentos en la provincia de Imbabura (Ecuador)

**Mayra Alexandra Maya Nicolalde**

Ingeniera Industrial – Universidad Técnica del Norte.

Maestrante Direcciones de Operaciones y Seguridad Industrial – Universidad de las Américas  
Docente Universidad Técnica del Norte – Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas – Carrera de Ingeniería Industrial.

mamaya@utn.edu.ec

## Resumen

En el Ecuador, en los últimos años se ha aprobado leyes y reglamentos que buscan el beneficio de los 16.235.900 de ecuatorianos, orientados al Buen Vivir como forma de vida que permite la felicidad y la permanencia de la diversidad cultural y ambiental, la armonía, igualdad, equidad y solidaridad.

Una alimentación que garantice su calidad debe cumplir con los requerimientos de ley que establecen el cumplimiento de las Buenas Prácticas de Manufactura BPM. La ARCSA (Agencia de Regulación, Control y Vigilancia Sanitaria) ha establecido un límite de tiempo que no ha sido atendido; en los meses pasados se hubiese cerrado un gran porcentaje de empresas por este incumplimiento. Para evitar eso, se decretó la última extensión de tiempo para su cumplimiento, hasta mayo del 2016.

Instituciones gubernamentales, aliadas con la academia, promueven generar conocimiento y llevarlo a la práctica; se unen con el fin de ejecutar el proyecto de mejoramiento productivo, mediante la implementación de las BPM en las empresas productoras de alimentación y las de prestación de servicios de alimentación colectiva en la provincia de Imbabura.

El levantamiento de la línea base dio como resultado que el 70% de las empresas productoras de alimentación y las de prestación de servicios de alimentación colectiva en la provincia de Imbabura, evidenciaran un porcentaje mínimo de cumplimiento de BPM; comprobando que para el plazo de tiempo, estas empresas podrían ser cerradas. Para evitarlo se inicia el fortalecimiento de las capacidades productivas en diferentes áreas del conocimiento productivo, mediante capacitación, asesoramiento y aplicación de planes de mejoras que les permita cumplir con la ley y generar mejores oportunidades de negocio y estabilidad económico-social, asociativa del país.

**Palabras clave:** Buenas Prácticas de Manufactura, Procesos, Alimentos, Buen Vivir, Matriz Productiva.

## 1. Introducción

Las buenas prácticas de manufactura en el área de alimentos en la provincia de Imbabura permiten mejorar la calidad de vida de la población, consolidando el sistema económico social y solidario de forma sostenible, impulsando la transformación de la matriz productiva, mediante el fortalecimiento de las capacidades y potencialidades de la ciudadanía.

Se busca garantizar productos que cumplan con la normativa nacional y que puedan incrementar sus actividades productivas dirigiéndose hacia nuevos mercados internacionales, así como, potenciar nuevos productos para generar nuevas oportunidades de negocio que inicien sus procesos de manera eficiente y con calidad.

El proyecto es ejecutado para alcanzar los siguientes objetivos:

- Diagnosticar la situación actual en el sector de alimentos a través de la línea base propuesta.
- Diseñar los planes de mejora sobre la base del diagnóstico para la socialización de los establecimientos productivos potenciales.
- Capacitar al personal involucrado en los procesos productivos a través de los planes de mejora para la implementación en cada uno de los establecimientos.
- Implementar los planes de mejora bajo la participación del personal involucrado en los procesos para definir puntos críticos de control.
- Controlar los puntos críticos a través de herramientas de calidad para garantizar la inocuidad alimentaria.
- Evaluar el desempeño de cada uno de los establecimientos a través de los indicadores para satisfacer las necesidades de los clientes.

## 2. Desarrollo

### 2.1 Levantamiento de la Línea Base

Se realizó el levantamiento de la información mediante las fichas de verificación de la ARCSA, evaluando los siguientes indicadores:

- **Empresas Productoras**

Tabla 1. Indicadores Ficha de Verificación Empresas Productoras

<b>CAPÍTULO I. INSTALACIONES</b>
<b>ART. 3 DE LAS CONDICIONES MÍNIMAS BÁSICAS</b>
<b>ART. 4 DE LA LOCALIZACIÓN</b>
<b>ART. 6 CONDICIONES ESPECÍFICAS DE LAS ÁREAS, ESTRUCTURAS INTERNAS Y ACCESORIOS</b>
<b>I. Distribución de áreas</b>
<b>II. Pisos, paredes, techos y drenajes</b>
<b>III. Ventanas, puertas y otras aberturas</b>
<b>IV. Escaleras, Elevadores y Estructuras Complementarias (rampas, plataformas)</b>
<b>V. Instalaciones eléctricas y redes de agua</b>
<b>VI. Iluminación</b>
<b>VII. Calidad del aire y Ventilación</b>
<b>VIII. Control de Temperatura y Humedad Ambiental</b>
<b>IX. Instalaciones Sanitarias</b>
<b>ART. 7 SERVICIOS DE PLANTA – FACILIDADES</b>
<b>I. Suministro de agua</b>
<b>II. Suministro de vapor</b>

III. Disposición de desechos líquidos
V. Disposición de desechos sólidos
<b>CAPÍTULO II. DE LOS EQUIPOS Y UTENSILIOS</b>
<b>ART. 8 SELECCIÓN, FABRICACIÓN E INSTALACIÓN</b>
<b>ART. 9 MONITOREO DE LOS EQUIPOS:</b>
<b>CAPÍTULO III. PERSONAL</b>
<b>ART. 10 CONSIDERACIONES GENERALES</b>
<b>ART. 11 EDUCACIÓN Y CAPACITACIÓN</b>
<b>ART. 12 ESTADO DE SALUD</b>
<b>ART. 13 HIGIENE Y MEDIDAS DE PROTECCIÓN</b>
<b>ART. 14 COMPORTAMIENTO DEL PERSONAL</b>
<b>ART. 15 EL ACCESO A ÁREAS DE PROCESO A PERSONAL NO AUTORIZADO</b>
<b>ART. 16 SISTEMA DE SEÑALIZACIÓN</b>
<b>ART. 17 LAS VISITAS</b>
<b>CAPÍTULO IV. MATERIALES E INSUMOS</b>
<b>ART. 26 AGUA</b>
1. Como materia prima
2. Para los equipos
<b>CAPÍTULO V. OPERACIONES DE PRODUCCIÓN</b>
<b>ART. 29 CONDICIONES AMBIENTALES</b>
<b>ART. 30 VERIFICACIÓN ANTES DE LA FABRICACIÓN</b>
<b>CAPÍTULO IV: ENVASADO, ETIQUETADO Y EMPAQUETADO</b>
<b>CAPÍTULO VI: ALMACENAMIENTO, DISTRIBUCIÓN, TRANSPORTE Y COMERCIALIZACIÓN</b>
<b>GARANTÍA DE CALIDAD - CAPÍTULO ÚNICO: DEL ASEGURAMIENTO Y CONTROL DE CALIDAD</b>

- **Alimentación Colectiva**

Tabla 2. Indicadores Ficha de Verificación Alimentación Colectiva

<b>1. REQUISITOS Y CARACTERÍSTICAS INFRAESTRUCTURALES GENERALES</b>
<b>2. BODEGAS</b>
<b>3. ÁREA DE PREPARACIÓN DE ALIMENTOS Y BEBIDAS</b>
<b>4. ÁREA DE LAVADO</b>
<b>5. ÁREA DE ALMACENAMIENTO Y/O CONSERVACIÓN DE ALIMENTOS</b>
<b>6. INSTALACIONES SANITARIAS - ÁREA DE SERVICIOS SANITARIOS</b>
<b>7. PERSONAL</b>
<b>8. PRÁCTICAS CORRECTAS DE PREPARACIÓN DE ALIMENTOS Y BEBIDAS</b>
<b>9. OTROS REQUISITOS</b>

Este levantamiento se realizó a 92 empresas productoras y a 10 empresas prestadoras de servicio de alimentación colectiva, con la colaboración de 60 estudiantes de la Universidad Técnica del Norte en los cantones de la provincia de Imbabura, dando como resultados:

Tabla 3. Resultados Verificación

<b>EMPRESAS VERIFICADAS</b>	<b>EMPRESAS CERRADAS</b>	<b>EMPRESAS INGRESO NEGADO</b>	<b>EMPRESAS DIRECCIONES NO ENCONTRADAS</b>
60	18	12	12

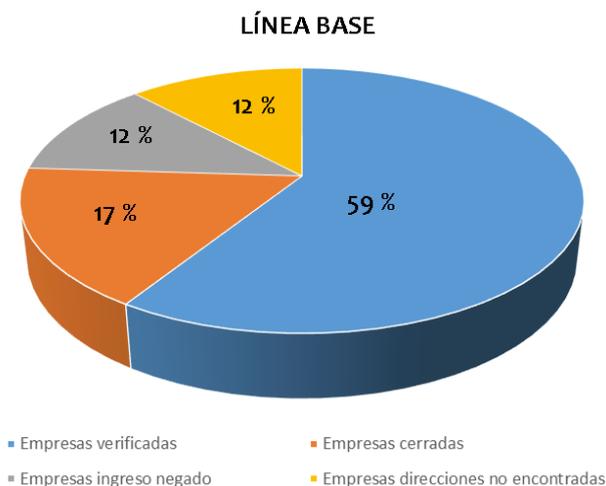


Figura 1. Porcentajes de Verificación.

Obteniendo como resultado, 50 empresas productoras de alimentos y 10 prestadoras de servicio de alimentación colectiva verificadas, con los siguientes porcentajes de cumplimiento:

- Empresas Productoras**

Tabla 4. Resultado Grupal Empresas Productoras

Resultado Grupal Empresas Productoras				
Total General	Total A Cumplir	Cumple	No Cumple	No Aplica
178	153,56	96,4	57,16	24,44

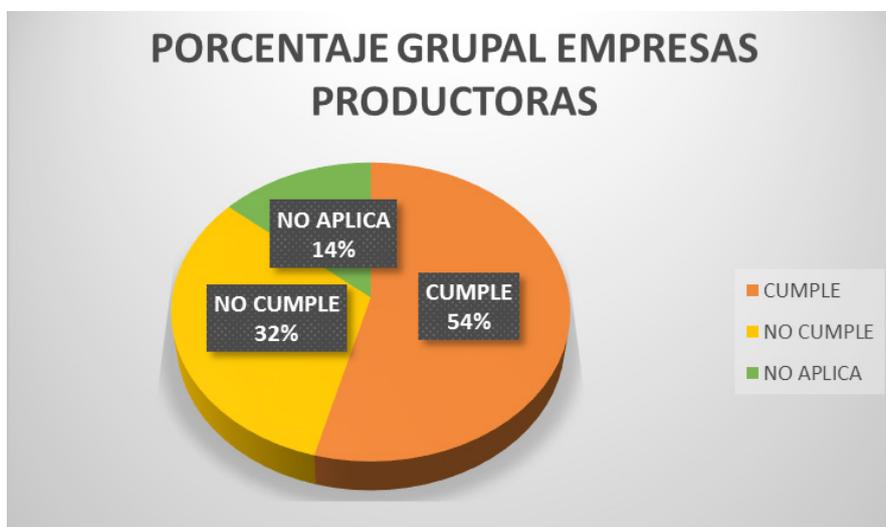


Figura 2. Porcentaje Grupal Empresas Productoras.

Las empresas productoras tienen un cumplimiento general del 54% de la normativa nacional de buenas prácticas de manufactura.

- Alimentación Colectiva**

Tabla 5. Resultado Grupal Alimentación Colectiva

Resultado Grupal Alimentación Colectiva				
Total General	Total A Cumplir	Cumple	No Cumple	No Aplica
68	62,4	43,8	18,6	5,6

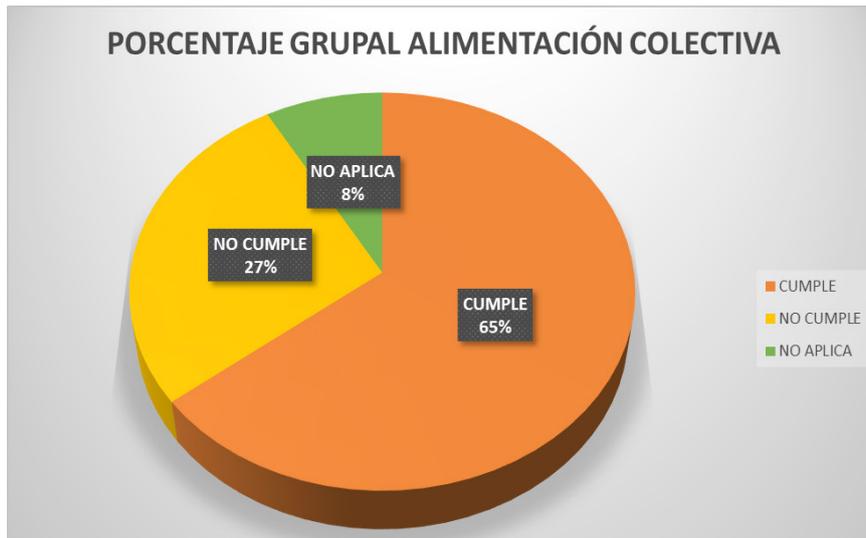


Figura 3. Porcentaje Grupal Alimentación Colectiva.

Las empresas prestadoras de servicio de alimentación colectiva tienen un cumplimiento general del 64% de la normativa nacional de buenas prácticas de manufactura.

## 2.2 Fortalecimiento de las capacidades productivas

De acuerdo con los resultados obtenidos en la línea base, se identificó que las empresas productoras y las organizaciones que prestan servicios de alimentación colectiva, realizan sus actividades de manera empírica y con desconocimiento de los procesos productivos para el área de alimentos. En esta fase se procedió con la capacitación para fortalecer las capacidades productivas, sobre la base de la siguiente metodología:

- **Empresas Productoras**

Tabla 6. Metodología Capacitación BPM Empresas Productoras

UNIDAD I. REQUISITOS DE LAS INSTALACIONES	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
1.1 Establecimientos.			
1.2 Precauciones en las instalaciones para facilitar la limpieza y prevenir la contaminación.			Computador,
1.3 Contaminación por material en contacto con alimentos.			Proyector,
1.4 Prevención de la contaminación por mal manejo de agua y desechos.	4	2	Material Didáctico (documento impreso).
1.5 Marco adecuado de producción.			
1.6 Entorno			
UNIDAD II. CONTROL DE LAS OPERACIONES	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
2.1 Compra, recepción y almacenamiento de Materias Primas.			
2.2 Almacenamiento y mantenimiento en frío de alimentos perecederos.			
2.3 Almacenamiento de alimentos no perecederos.			Computador,
2.4 Elaboración.			Proyector,
2.5 Control de los envases.			
2.6 Almacenamiento y distribución.	4	2	Material Didáctico (documento impreso).
2.7 Trazabilidad.			
2.8 Manipulación, almacenamiento y eliminación de devoluciones y desechos.			
2.9 Mantenimiento.			

UNIDAD III. PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS ESTANDARIZADOS DE SANEAMIENTO	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
3.1 Introducción.			
3.2. Limpieza y desinfección.			
3.3. Programa de inspección de la higiene.			Computador,
3.4. Procedimiento para realizar un buen saneamiento.			Proyector,
3.5. Almacenamiento y eliminación de los desechos y residuos.	4	2	Material Didáctico (documento impreso).
3.6. Plan de control de plagas en el establecimiento.			
UNIDAD IV. HIGIENE PERSONAL. CAPACITACIÓN	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
4.1 Objetivos.			
4.2 Estado de salud.			Computador,
4.3 Higiene personal.			Proyector,
4.4 Comportamiento del personal.			Material Didáctico (documento impreso).
4.5 Visitas.			
4.6 Capacitación del personal.	4	2	
4.7 Enfermedades Transmitidas por Alimentos			
UNIDAD V. DOCUMENTACIÓN Y REGISTROS	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
5.1 Introducción.			Computador,
5.2 Objetivo de la documentación.			Proyector,
5.3 Niveles y tipos de documentos.			Material Didáctico (documento impreso).
5.4 Estructura de la documentación.	4	2	
5.5 Documentos clave en las BPM.			
UNIDAD VI. AUDITORÍAS Y PROGRAMAS DE INSPECCIÓN	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
6.1 Indicadores de auditoría	2	2	

- **Alimentación Colectiva**

Tabla 7. Metodología Capacitación BPM Alimentación Colectiva

UNIDAD I. CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES DONDE SE PREPARA LOS ALIMENTOS	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
<b>Temas</b>			
1. Pisos, paredes, techos, ventanas, puertas.			Computador,
2. Lavabos y desagües.			Proyector,
3. Baños y vestidores.			Material Didáctico (documento impreso).
4. Iluminación y aireación.	2	2	
5. Utensilios y herramientas.			
UNIDAD II. RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTOS DE LOS ALIMENTOS	HORAS	ASESORÍA	RECURSOS

<b>Temas</b>			
1. Inspección.			Computador,
2. Selección y clasificación.			Proyector,
3. Tipos de alimentos.			Material Didáctico
4. Almacenamiento.	2	3	(documento impreso).
<b>UNIDAD III. EL DETERIORO Y LA CONTAMINACIÓN DE LOS ALIMENTOS.</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>
<b>Temas</b>			
1. Contaminación Biológica.			Computador,
2. Contaminación Química.			Proyector,
3. Contaminación Física.			Material Didáctico
4. Contaminación Cruzada.	2	2	(documento impreso).
<b>UNIDAD IV. ENFERMEDADES TRANSMITIDAS POR LOS ALIMENTOS.</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>
<b>Temas</b>			
1. Causas.			Computador,
2. Síntomas.			Proyector,
3. Intoxicación.			Material Didáctico
4. Infección.			(documento impreso).
5. Prevención.			
6. Primeros Auxilios para ETAS.	4		
<b>UNIDAD V. LA HIGIENE DEL MANIPULADOR DE ALIMENTOS</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>
<b>Temas</b>			
1. La higiene personal.			Computador,
2. Hábitos higiénicos del manipulador.			Proyector,
3. Indumentaria de trabajo.			Material Didáctico
4. Técnica del Lavado de Manos.			(documento impreso).
5. La salud personal (enfermedades, carnet de salud).	1	3	
<b>UNIDAD VI. LA COMPRA DE ALIMENTOS</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>
<b>Temas</b>			
1. Etiqueta de los alimentos.			Computador,
2. Características de las frutas y hortalizas.			Proyector,
3. Características de los productos cárnicos.			Material Didáctico
4. Características de los productos lácteos.			(documento impreso).
5. Características de las conservas y enlatados.			
6. Características de los cereales y derivados.	2	2	
<b>UNIDAD VII. CONSERVACIÓN DE LOS ALIMENTOS</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>
<b>Temas</b>			
1. Refrigeración.			Computador,
2. Congelación.			Proyector,
3. Descongelación de los alimentos.			Material Didáctico
4. Almacenamiento adecuado de los alimentos en el refrigerador.	2	1	(documento impreso).
<b>UNIDAD VIII. LA HIGIENE Y LIMPIEZA</b>	<b>CAPACITACIÓN</b>	<b>ASESORÍA</b>	<b>RECURSOS</b>

Temas			
1. Productos de limpieza y desinfección (detergentes y desinfectantes).			
2. Limpieza de utensilios (cuchillos, ollas, pailas, otros).			Computador,
3. Limpieza de equipos y electrodomésticos.			Proyector,
4. Limpieza de áreas de almacenamiento (bodegas).			Material Didáctico (documento impreso).
5. Limpieza de baños.	2	3	
6. Procedimientos.			

UNIDAD IX. MANEJO DE RESIDUOS	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
Temas			
1. Disposición.			Computador,
2. Clasificación.			Proyector,
3. Eliminación.	2	1	Material Didáctico (documento impreso).

UNIDAD X. LAS PLAGAS Y SU CONTROL	CAPACITACIÓN	ASESORÍA	RECURSOS
Temas			
1. Tipos de plagas: insectos, roedores, aves.			Computador,
2. Detección de la presencia.			Proyector,
3. Métodos para el control y erradicación de las plagas.	2	2	Material Didáctico (documento impreso).
4. Plan de desratización y desinsectación.			

### 2.3 Acompañamiento Técnico (Plan de Mejoras).

El Plan de mejoras se basa en un Manual de Buenas Prácticas de Manufactura por cada una de las empresas productoras y organizaciones que prestan servicios de alimentación colectiva, ya que las condiciones productivas por producto necesitan diferentes factores. A continuación se presenta la guía correspondiente:

## MANUAL DE BUENAS PRÁCTICAS DE MANUFACTURA



**ASOSERTEÑAS**

IMBAYA, Junio 2014

**TABLA DE CONTENIDO**

INTRODUCCIÓN.....	3
PRESENTACIÓN.....	4
1. PROCEDIMIENTOS.....	5
1.1. Procedimiento de Limpieza y Desinfección .....	5
1.2. Procedimiento de Señalización.....	10
1.3. Procedimiento de Compra .....	18
1.4. Procedimiento de Transporte de Materia Prima.....	21
1.5. Procedimiento de Almacenamiento .....	25
1.6. Procedimiento de manipulación de alimentos.....	33
1.6.1. Procedimiento de Cocción de Alimentos .....	36
1.6.2. Procedimiento para Desinfección y Cloración de Vegetales .....	38
1.7. Procedimiento de Empaquetado.....	39
1.8. Procedimiento de Manejo de Residuos y Control de Plagas.....	41
2. DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	46
ANEXOS.....	49

## Introducción

Todo fabricante de alimentos debe tener como misión, entregar a los consumidores productos de buena calidad, seguros y confiables, lo más cercano posible a los productos naturales, que conserven características saludables y sean económicamente accesibles, seleccionando las mejores materias primas, con los más altos estándares de calidad. Debe además brindar el más alto nivel de satisfacción a los consumidores, y a la vez investigar constantemente las tendencias en cuanto a los hábitos alimentarios, para poder responder a los cambios en la demanda de los consumidores.

El Manual de Buenas Prácticas de Manufactura (BPM) comprende todos los procedimientos necesarios que se aplica en la elaboración de alimentos, con el fin de garantizar su seguridad, empleados en toda la cadena de producción, incluyendo materias primas, elaboración, envasado, almacenamiento, transporte y distribución.

Su propósito es aportar orientación para que las personas que forman parte de la asociación autoevalúen su establecimiento, identifiquen debilidades o defectos y tengan la posibilidad de corregirlos, y que las autoridades sanitarias cuenten con una guía que les permita corroborar la evolución del nivel sanitario del establecimiento y dar seguimiento a los compromisos de mejoramiento establecidos en forma conjunta con los propietarios.

Naturalmente, es necesario comprender que el contenido de este Manual no podrá ser aplicado al pie de la letra, ya que en algunos casos variará de acuerdo con las características específicas de cada establecimiento; será una eficiente guía o herramienta de trabajo, de fácil adaptabilidad, que facilite las labores de aseguramiento de calidad.

## 1. PROCEDIMIENTOS

### 1.1. Procedimiento de Limpieza y Desinfección

	<b>PROCEDIMIENTOS DE LIMPIEZA Y DESINFECCIÓN</b>	<b>CÓDIGO:</b> ASS-P01
		<b>VERSIÓN:</b> 01
<b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industrial.	<b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya	

#### Objetivo

Suministrar información sencilla, clara y concisa sobre la importancia de la limpieza y desinfección de las diferentes áreas, así como los procedimientos adecuados que aseguren la eliminación de peligros de contaminación de los productos, basándose en las BPM (Buenas Prácticas de Manufactura).

#### ALCANCE

Aplica desde el proceso de limpieza de instalaciones, equipos y utensilios, hasta la desinfección de los mismos.

#### RESPONSABLES

La persona que administra el lugar, en conjunto con todo el personal, será la responsable de facilitar las condiciones requeridas para una correcta ejecución, dentro de lo cual se encuentra el aprovisionamiento de los equipos, utensilios y artículos de limpieza indispensables, así como de verificar el cumplimiento de todas las tareas, el aseo del área de trabajo, de los utensilios que se emplea, los cuales deben quedar listos para ser usados por la persona que ocupe su lugar, o listos para guardar.

## DEFINICIONES

### Limpiar

Significa eliminar la suciedad visible y restos de alimentos de las superficies, mediante el uso de agua, detergentes, cepillos, entre otros materiales. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011)

### Desinfectar

Significa eliminar la suciedad no visible -microorganismos- de las superficies, mediante el uso de productos químicos desinfectantes, agua caliente. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

### Higiene

Es el mantenimiento de las condiciones de limpieza de las instalaciones, maquinaria, equipos, personas u otros, relacionados directa o indirectamente con la preparación de alimentos, para evitar su contaminación con agentes externos que puedan hacerlos nocivos para la salud. (PROMpyme)

### Contaminación

Es la presencia de cualquier materia objetable en el producto, que ensucie, infecte e intoxique el alimento. (PROMpyme)

### Área externa

Comprende las paredes, vías de acceso (veredas, pistas) y el entorno del establecimiento. (PROMpyme)

### Área interna

Comprende áreas como la recepción, el salón, los servicios higiénicos para comensales y el personal, la cocina, los almacenes, vestidores y zona de tratamiento de desperdicios. (PROMpyme)

## Referencias

Certificación HACCP. FPI Food Product Integrity. Recuperado de: <http://www.foodknowledge.info/contenidos.php?menu=31&submenu1=33&idiom=1>

Congreso Nacional de la República del Ecuador. (2006). Ley Orgánica de Salud. Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006. Recuperado de: [http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC\\_Ley\\_Organica\\_de\\_Salud.pdf](http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC_Ley_Organica_de_Salud.pdf)

Presidencia de la República del Ecuador. (2001). Reglamento de Registro y Control Sanitario de Alimentos. Recuperado de: <http://www.ecomint.com.ec/sanita.htm>

----- (2002). Reglamento de Buenas Prácticas para Alimentos Procesados. Recuperado de: <http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/leyes/rbpm.pdf>

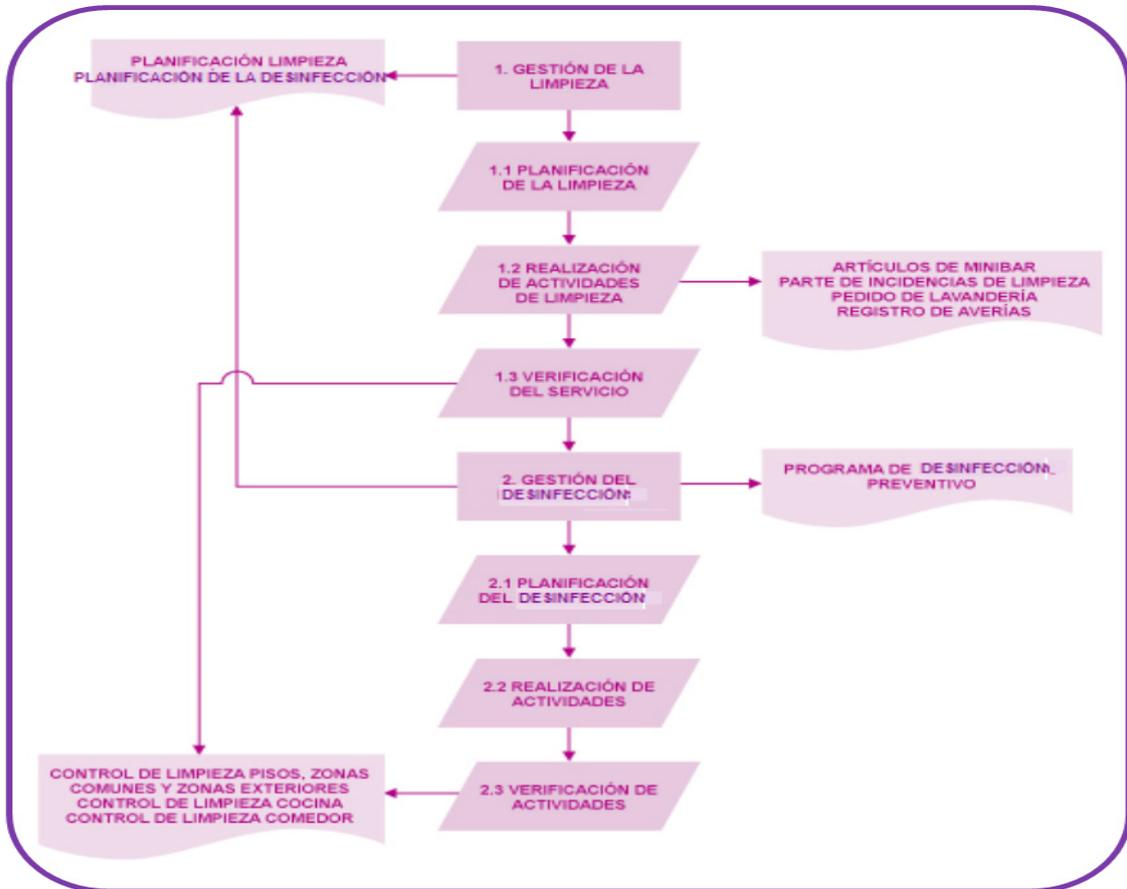
----- (s.f.). Decreto ejecutivo 3253. Recuperado de: [faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc](http://faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc)

República de Ecuador. (2008). Constitución Política de Ecuador. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.desarrollosocial.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/constitucion.pdf>

### Registros y Documentos

- ✓ Lista de sustancias químicas de limpieza (Anexo 1)
- ✓ Registro de inspección de limpieza y desinfección

### Procedimiento



### 1.2. Procedimiento de Señalización

	<b>PROCESO DE SEÑALIZACIÓN PARA ASOSERGONS</b>	<b>CÓDIGO: ASS-P02</b>
		<b>VERSIÓN: 01</b>
<b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industrial		<b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya

### Objetivo

- Realizar un manual de procedimientos para la colocación de señalética en la Planta de procesamiento de alimentos ASOSERGONS, con el fin de ayudar a prevenir accidentes en caso de situaciones de emergencia e incrementar la calidad de vida de los operarios que allí laboran.
- Identificar la señalética esencial para una planta de producción de alimentos como ASOSERGONS.

## Alcance

Este procedimiento está dirigido a todas las personas de ASOSERGONS que realizan cualquier actividad productiva en el interior de la planta, ya que es de conocimiento general y necesario.

## Documentación y Registro:

- Tarjetas de señalización

## Responsables

Representantes legales de la asociación (Rosa Otavalo y Sara Farinango).

## Definiciones

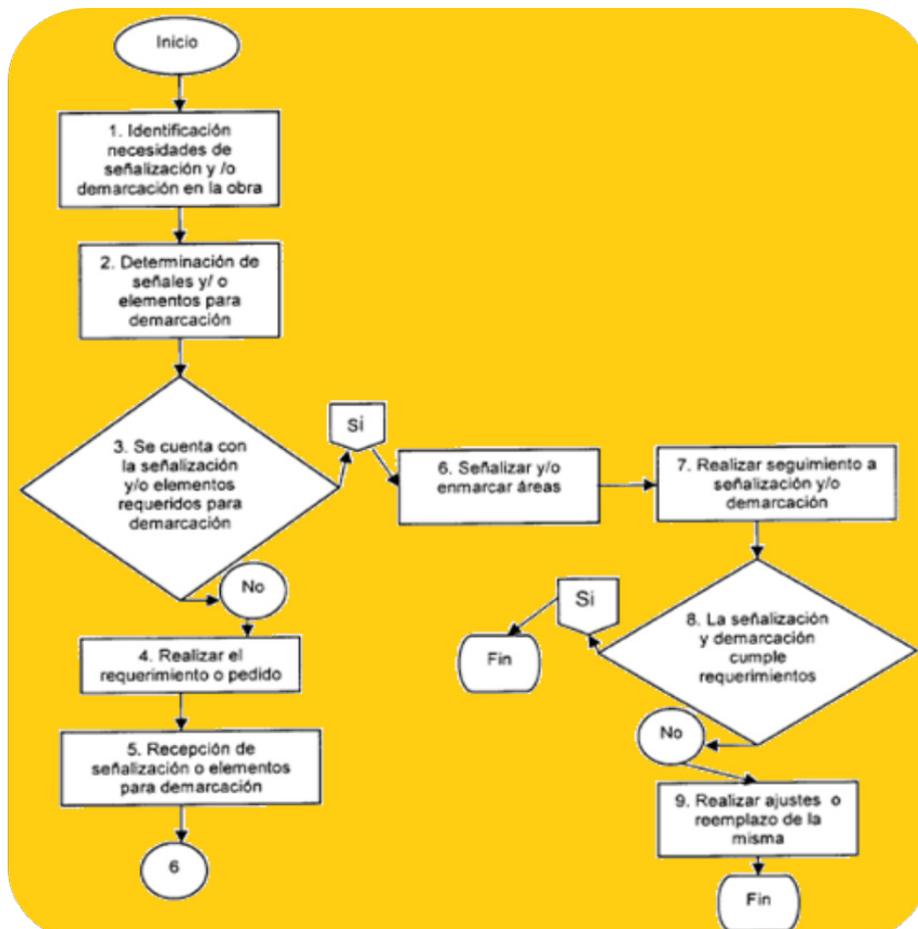
**Análisis:** Acción de dividir un problema en tantas partes como sea posible, para reconocer la naturaleza de las partes, las relaciones entre éstas y obtener conclusiones objetivas del todo.

**Accidente:** Es el suceso repentino que sobreviene por causa o con ocasión del trabajo, y que produce en el trabajador una lesión orgánica, una perturbación funcional, una invalidez o la muerte; así como aquel que se produce durante la ejecución de órdenes del empleador, aún fuera del lugar y horas de trabajo, o durante el traslado de los trabajadores desde su residencia a los lugares de trabajo o viceversa, cuando el transporte sea suministrado por el empleador.

**Botiquín:** Es el recurso básico para las personas que prestan primeros auxilios. Debe contener antisépticos, material de curación, vendajes, tijeras, linternas y si se necesita, una camilla.

**Brigada de seguridad:** Estará conformada por personas que aseguren el soporte logístico del plan de emergencias, por lo tanto deben conocer las instalaciones, rutas y alarmas. Estas personas serán entrenadas en extinción de incendios, rescates y salvamentos.

## Procedimiento:



### 1.3. Procedimiento de Compra

	<p style="text-align: center;"><b>PROCESO DE COMPRA DE MATERIA PRIMA</b></p>	<p><b>CÓDIGO: ASS-P03</b></p>
		<p><b>VERSIÓN: 01</b></p>
<p><b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industria.</p>		<p><b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya In Ing. Mayra Maya</p>

#### Objetivo

Adquirir materia prima de buena calidad, dada su repercusión directa en la calidad del producto final elaborado, con la finalidad de brindar un producto final de mejor calidad para los Centros Infantiles del Buen Vivir –CIBV-.

#### ALCANCE

Aplica desde la identificación de los proveedores de la materia prima hasta la adquisición o compra de las mismas.

#### RESPONSABLES

El responsable de vigilar el cumplimiento y operatividad de este procedimiento es la Sra. Rosa Otavalo y la Sra. Sara Farinango.

#### DEFINICIONES

##### Materia prima

Es toda sustancia que, para ser utilizada como alimento, necesita sufrir tratamiento y/o transformación de naturaleza física, química o biológica. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

##### Alimento

Toda sustancia o mezcla de sustancias naturales o elaboradas que, ingeridas por el hombre, aporten a su organismo los materiales y la energía necesarios para el desarrollo de sus procesos biológicos. La designación “alimento” incluye además las sustancias o mezclas de sustancias ingeridas por hábito, costumbres, o como coadyuvantes, tengan o no, valor nutritivo.

##### Proveedor

Es la persona o empresa que abastece con algo a otra empresa o a una comunidad. El término procede del verbo proveer, que hace referencia a suministrar lo necesario para un fin. (Diccionario de la Lengua Española, 2014).

##### Calidad

Es la totalidad de las características de un producto – servicio, que le confieren la capacidad de satisfacer las exigencias establecidas e implícitas de los clientes. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

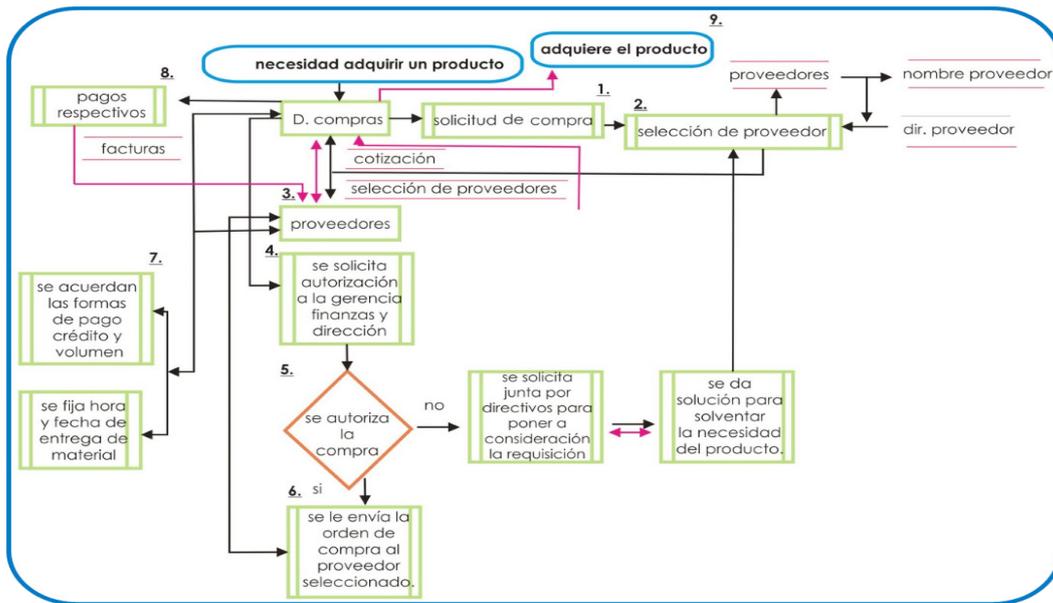
##### Precio

Es el valor monetario que se le asigna a algo. Todos los productos y servicios que se ofrece en el mercado tienen un precio, que es el dinero que el comprador o cliente debe abonar para concretar la operación. (Diccionario de la Lengua Española, 2014), (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011)

## Referencias

- Certificación HACCP. FPI Food Product Integrity. Recuperado de: <http://www.foodknowledge.info/contenidos.php?menu=31&submenu1=33&idiom=1>
- Congreso Nacional de la República del Ecuador. (2006). Ley Orgánica de Salud. Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006. Recuperado de: [http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC\\_Ley\\_Organica\\_de\\_Salud.pdf](http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC_Ley_Organica_de_Salud.pdf)
- Presidencia de la República del Ecuador. (2001). Reglamento de Registro y Control Sanitario de Alimentos. Recuperado de: <http://www.ecomint.com.ec/sanita.htm>
- (2002). Reglamento de Buenas Prácticas para Alimentos Procesados. Recuperado de: <http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/leyes/rbpm.pdf>
- (s.f.). Decreto ejecutivo 3253. Recuperado de: [faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc](http://faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc)
- Real Academia Española. (2014) Diccionario de la Lengua Española, 2014
- República de Ecuador. (2008). Constitución Política de Ecuador. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.desarrollosocial.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/constitucion.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de la República de Ecuador. (2011). Recuperado de: <http://www.agricultura.gob.ec/>

**Procedimiento**



**1.4 Procedimiento de Transporte de Materia Prima**

	<p><b>PROCESO DE TRANSPORTE Y RECEPCIÓN DE MATERIA PRIMA</b></p>	<p><b>CÓDIGO:</b> ASS-P04</p>
		<p><b>VERSIÓN:</b> 01</p>
<p><b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industrial</p>		<p><b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya</p>

**Objetivo**

Transportar y recibir la materia prima mediante la aplicación de buenas prácticas de manufactura BPM con la finalidad de no perder las propiedades y evitar su contaminación.

**ALCANCE**

Aplica desde el transporte de la materia prima desde el lugar de su compra hasta la recepción de la materia prima al lugar de procesamiento.

**RESPONSABLES**

Las responsables de vigilar el cumplimiento y operatividad de este procedimiento son las Sra. Rosa Otavalo y Sara Farinango, conjuntamente con el señor transportista.

**DEFINICIONES**

**Materia prima**

Es toda sustancia que, para ser utilizada como alimento, necesita sufrir tratamiento y/o transformación de naturaleza física, química o biológica. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

**Calidad**

Es la totalidad de las características de un producto – servicio, que le confieren la capacidad de satisfacer las exigencias establecidas e implícitas de los clientes. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

### **Alimento alterado**

Aquél que por causas naturales de índole física, química y/o biológica o aquellas derivadas de tratamientos tecnológicos inadecuados y/o deficientes, aisladas o combinadas, ha sufrido deterioro en sus características organolépticas, en su composición intrínseca y/o en su valor nutritivo. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

### **Alimento contaminado**

El que contenga:

- Agentes vivos (virus, microorganismos o parásitos riesgosos para la salud), sustancias químicas, minerales u orgánicas extrañas a su composición normal, sean o no repulsivas o tóxicas.
- Componentes naturales tóxicos en concentración mayor a las permitidas por exigencias reglamentarias. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011)

### **Alimento adulterado**

El que ha sido privado, en forma parcial o total, de sus elementos útiles o característicos, reemplazándolos -o no- por otros inertes o extraños; que ha sido complementado con aditivos no autorizados o sometidos a tratamientos de cualquier naturaleza para disimular u ocultar alteraciones, deficiente calidad de materias primas o defectos de elaboración. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011)

### **Alimento falsificado**

El que tenga la apariencia y caracteres generales de un producto legítimo protegido -o no- por marca registrada, y se denomine como éste, sin serlo o que no proceda de sus verdaderos fabricantes o zona de producción conocida y/o declarada. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011)

### **Alimento envasado**

Es todo alimento que está contenido en un envase listo para ofrecerlo al consumidor. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

### **Alimento no perecedero**

Es aquel que puede almacenarse en depósito seco y fresco, sin necesidad de heladera. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

### **Alimento perecedero**

Es aquel que se deteriora y necesita conservación inmediata en heladera o congelador. (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2011).

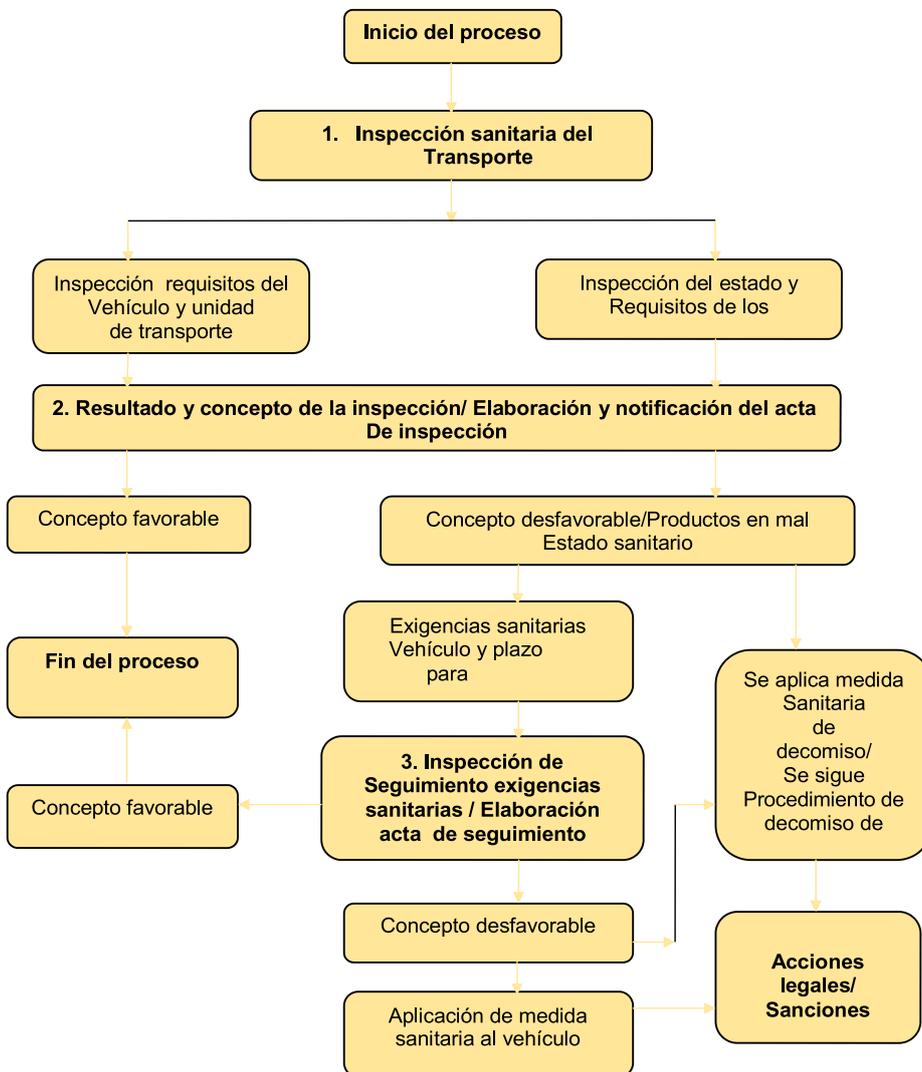
## **Referencias**

- Certificación HACCP. FPI Food Product Integrity. Recuperado de: <http://www.foodknowledge.info/contenidos.php?menu=31&submenu1=33&idiom=1>
- Congreso Nacional de la República del Ecuador. (2006). Ley Orgánica de Salud. Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006. Recuperado de: [http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC\\_Ley\\_Organica\\_de\\_Salud.pdf](http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC_Ley_Organica_de_Salud.pdf)
- Presidencia de la República del Ecuador. (2001). Reglamento de Registro y Control Sanitario de Alimentos. Recuperado de: <http://www.ecomint.com.ec/sanita.htm>
- (2002). Reglamento de Buenas Prácticas para Alimentos Procesados. Recuperado de: <http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/leyes/rbpm.pdf>
- (s.f.). Decreto ejecutivo 3253. Recuperado de: [faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc](http://faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc)
- República de Ecuador. (2008). Constitución Política de Ecuador. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.desarrollosocial.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/constitucion.pdf>

### REGISTROS Y DOCUMENTOS

- ✓ Registro de recepción de materia prima (Anexo 1)

#### PROCEDIMIENTO



#### 1.1 Procedimiento de Almacenamiento

	<b>PROCESO DE ALMACENAMIENTO</b>	<b>CÓDIGO: ASG-P05</b>
		<b>VERSIÓN: 01</b>
<b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industrial.		<b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya

#### Objetivo

Almacenar materia prima, productos semi-procesados, y procesados en condiciones óptimas de protección contra la alteración del producto o los daños al recipiente o envase para impedir la contaminación y/o la proliferación de microorganismos en los alimentos.

## **ALCANCE**

Este procedimiento está dirigido a las personas encargadas del almacenamiento de alimentos en la asociación ASOSERGONS.

### **Documentación y Registro:**

- Listado de Proveedores y Productos (Anexo 3)
- Registro de Recepción, Almacenamiento (Anexo 2)

## **RESPONSABLES**

Personal encargado del proceso de almacenamiento (Rosa Otavalo y Sara Farinango)

## **DEFINICIONES**

### **Alimento.**

Todo producto natural o artificial, elaborado o no, que ingerido aporta al organismo humano los nutrientes y la energía necesaria para el desarrollo de los procesos biológicos. Quedan incluidas en la presente definición las bebidas no alcohólicas y aquellas sustancias con que se sazona algunos comestibles, conocidas con el nombre genérico de especias.

### **Buenas prácticas de manufactura.**

Son los principios básicos y prácticas generales de higiene en la manipulación, preparación, elaboración, envasado, almacenamiento, transporte y distribución de alimentos para consumo humano, con el objeto de garantizar que los productos sean fabricados en condiciones sanitarias adecuadas y se disminuya los riesgos inherentes a la producción.

### **Alimento adulterado.**

Es aquel:

- a) Al cual se le ha sustraído parte de los elementos constituyentes, reemplazándolos o no por otras sustancias.
- b) Que ha sido adicionado con sustancias no autorizadas.
- c) Que ha sido sometido en forma fraudulenta a tratamientos que disimulen u oculten sus condiciones originales y su calidad normal.

### **Alimento alterado.**

Alimento que sufre modificación o degradación parcial o de los constituyentes que le son propios, por agentes físicos, químicos o biológicos.

### **Alimento contaminado.**

Alimento que presenta o contiene agentes y/o sustancias extrañas de cualquier naturaleza en cantidades superiores a las permitidas en las normas nacionales, o en su defecto en normas reconocidas internacionalmente.

### **Alimento perecedero.**

El alimento que, en razón de su composición, características fisicoquímicas y biológicas, pueda experimentar alteración de diversa naturaleza en un tiempo determinado y que, por lo tanto, exige condiciones especiales de proceso, conservación, almacenamiento, transporte y expendio.

### **Ambiente.**

Cualquier área interna o externa delimitada físicamente que forma parte del establecimiento destinado a la fabricación, al procesamiento, a la preparación, al envase, almacenamiento y expendio de alimentos.

### **Desinfección – descontaminación.**

Es el tratamiento fisicoquímico o biológico aplicado a las superficies limpias en contacto con el alimento, con el fin de destruir las células vegetativas de los microorganismos que pueden ocasionar riesgos para la

salud pública y reducir substancialmente el número de otros microorganismos indeseables, sin que dicho tratamiento afecte adversamente la calidad e inocuidad del alimento.

### **Equipo.**

Es el conjunto de maquinaria, utensilios, recipientes, tuberías, vajillas y demás accesorios empleados en la fabricación, procesamiento, preparación, envase, fraccionamiento, almacenamiento, distribución, transporte, y expendio de alimentos y sus materias primas.

### **Materia prima.**

Son las sustancias naturales o artificiales, elaboradas o no, empleadas por la industria de alimentos para su utilización directa, fraccionamiento o conversión en alimentos para consumo humano. A pesar de que las materias primas pueden o no sufrir transformaciones tecnológicas, éstas deben ser consideradas como alimento para consumo humano.

### **Sustancia peligrosa.**

Es toda forma de material que durante la fabricación, manejo, transporte, almacenamiento o uso puede generar polvos, humos, gases, vapores, radiaciones o causar explosión, corrosión, incendio, irritación, toxicidad, u otra afección que constituya riesgo para la salud de las personas o causar daños materiales o deterioro del ambiente.

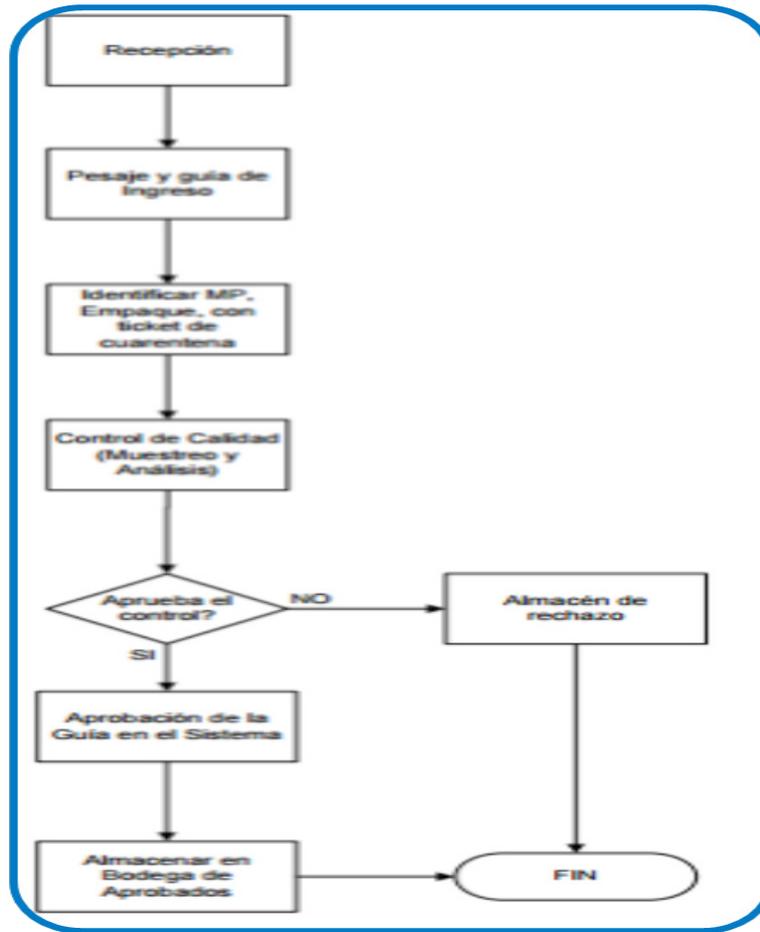
## **Referencias**

Norma ISO 9001-2000.- Sistema de Gestión de la calidad. Requisitos. Recuperado de: <http://www.chospab.es/calidad/archivos/Documentos/NormalInternacionalISO9001.pdf>

ASG IT, Asesoramiento, Servicios y Gestión. (2015) Instructivo de elaboración y control de documentos. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: <http://asg-it.com/>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. (2005). Norma Técnica NTS-USNA Sectorial Colombiana 007, Norma Sanitaria de Manipulación de Alimentos.

**PROCEDIMIENTO**



**1.1 Procedimiento de manipulación de alimentos**

	<p><b>PROCESO DE MANIPULACIÓN DE ALIMENTOS</b></p>	<p><b>CÓDIGO: ASG-Po6</b></p>
		<p><b>VERSIÓN: 01</b></p>
<p><b>ELABORADO POR:</b> Estudiantes Ingeniería Industrial</p>	<p><b>APROBADO POR:</b> Ing. Mayra Maya</p>	

**Objetivo**

Asegurar que la manipulación de los alimentos sea efectuada con la especificidad que se plasma en este procedimiento, para garantizar así la inocuidad de los mismos.

**ALCANCE**

Aplicar a la manipulación de todos los alimentos, sean éstos: frutas, verduras, hortalizas, legumbres o cárnicos, los cuales pueden o no estar preparados.

**RESPONSABLES**

Todas las operarias y operarios.

## DEFINICIONES

### Inocuidad

Es un término que implica seguridad; es decir, la confianza que tiene el consumidor en cuanto a que al ingerir un alimento, éste no sólo no va a causarle daño, sino que le aporta los nutrientes que necesita el organismo humano para mantener la vida y reunir los requisitos higiénicos – sanitarios que garanticen que no se producirá una enfermedad cuando sea consumido.

### Alimento Alterado

El que por causas naturales de índole física, química y/o biológica o derivadas de tratamientos tecnológicos inadecuados y/o deficientes, aisladas o combinadas, ha sufrido deterioro de sus características organolépticas, en su composición intrínseca y/o en su valor nutritivo.

### Alimento Contaminado

El que contenga:

- a) Agentes vivos (virus, microorganismos o parásitos riesgosos para la salud), sustancias químicas, minerales u orgánicas extrañas a su composición normal, sean -o no- repulsivas.
- b) Componentes naturales tóxicos en concentración mayor a la permitida por exigencias reglamentarias.

### Contaminación cruzada

Es la transferencia de bacterias peligrosas de un alimento a otro. Las bacterias que generalmente se encuentran en los alimentos son eliminadas en su mayoría durante la cocción, o el lavado en el caso de las frutas y verduras. Pero si estos alimentos, una vez cocidos o lavados, son puestos en contacto con alimentos crudos (carnes, pescados) o sin lavar (vegetales, frutas, etc.) pueden recontaminar.

## Referencias

- Certificación HACCP. FPI Food Product Integrity. Recuperado de: <http://www.foodknowledge.info/contenidos.php?menu=31&submenu1=33&idiom=1>
- Congreso Nacional de la República del Ecuador. (2006). Ley Orgánica de Salud. Ley 67, Registro Oficial Suplemento 423 de 22 de Diciembre del 2006. Recuperado de: [http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC\\_Ley\\_Organica\\_de\\_Salud.pdf](http://www.vertic.org/media/National%20Legislation/Ecuador/EC_Ley_Organica_de_Salud.pdf)
- Presidencia de la República del Ecuador. (2001). Reglamento de Registro y Control Sanitario de Alimentos. Recuperado de: <http://www.ecomint.com.ec/sanita.htm>
- (2002). Reglamento de Buenas Prácticas para Alimentos Procesados. Recuperado de: <http://www.epmrq.gob.ec/images/lotaip/leyes/rbpm.pdf>
- (s.f.). Decreto ejecutivo 3253. Recuperado de: [faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc](http://faolex.fao.org/docs/texts/ecu34738.doc)
- República de Ecuador. (2008). Constitución Política de Ecuador. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.desarrollosocial.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/10/constitucion.pdf>

### Conclusiones

El levantamiento de la línea base permitió identificar las necesidades de las empresas productoras de alimentos y las organizaciones de prestación de servicios de alimentación colectiva en la provincia de Imbabura: Los resultados evidencian que un 54% de las empresas productoras y un 65% de las organizaciones de prestación de servicios de alimentación colectiva en las BPM cumplen con la normativa vigente.

El fortalecimiento de las capacidades en las áreas productivas permite desarrollar procesos productivos eficientes, cumpliendo las normativas y requerimientos de los consumidores. Además, la estandarización de procedimientos permite incrementar las oportunidades de negocio.

La Asesoría técnica, acompañada de la implementación del plan de mejores, fortalece el proceso dando seguimiento y control para el cumplimiento de la normativa.

Los resultados obtenidos permiten el desarrollo provincial y las buenas condiciones de vida, obteniendo productos de calidad y generación de una economía sostenible y garantizada.

### Referencias

Codex Alimentarius, Ecuador. (2015). Comité Nacional del Codex Ecuatoriano. Recuperado de: <http://codex.inen.gob.ec/codex/paginasVarias/InformacionV.aspx>

Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). Recuperado de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/>

Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca de la República de Ecuador. (2011). Recuperado de: <http://www.agricultura.gob.ec/>

Presidencia de la República del Ecuador. (2014). Registro Oficial. Órgano del Gobierno del Ecuador. (2014). Reforma Oficial Reglamento Alimentos Procesados. Quito, Ecuador. Recuperado de: <http://www.controlsanitario.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/01/AM5179-Reforma-Reglamento-Alimentos-Procesados-4871.pdf>

Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2013). Plan Nacional para el Buen Vivir 2013-2017. Quito: Consejo Nacional de Planificación. Recuperado de: [www.buenvivir.gob.ec](http://www.buenvivir.gob.ec)

Povea, I. (2012). *Implementación de buenas prácticas de manufactura para la microempresa agroindustrial*. Bogotá, Colombia: Universidad de La Salle.



# Efecto de enzimas comerciales en la hidrólisis de residuos de cosecha de la caña de azúcar Pre-tratados con órgano-solvente

**Ángela Sofía Parra Paz**

Ingeniera Química,  
Magíster en Ingeniería Sanitaria y Ambiental  
Universidad Mariana  
asparra@umariana.edu.co

## Resumen

En este trabajo se evaluó la hidrólisis enzimática de hojas y cogollos de la caña de azúcar, previamente tratados con organosolventes. Con este fin se estudió el efecto del tiempo, la sinergia de las enzimas comerciales, el sustrato semi-deslignificado y la concentración de la composición enzimática. Para estructurar los cocteles enzimáticos se analizó primero la actividad de cada enzima. Las muestras deslignificadas parcialmente fueron preparadas atacando el sustrato a diferentes condiciones de operación. Para conocer la eficiencia de la hidrólisis se midió progresivamente la sacarificación y su dependencia con respecto a la relación enzima/sustrato, la cual se llamó índice global de hidrólisis (IGH). Los resultados mostraron que en la hidrólisis, la sinergia enzimática celulolítica y hemi-celulítica, es necesaria, y que la lignina del sustrato por debajo de una concentración en peso del 10%, parece no afectar apreciablemente el proceso.

Para un preparado enzimático de 0.52 FPU de celulasas/UI de hemicelulasas, se puede hidrolizar un sustrato con una composición en peso de 83%, 7% y 5% de celulosa, hemicelulosa y lignina respectivamente, hasta obtener un IGH con un valor de 82.3 unidades. Las condiciones para lograr obtener un porcentaje de sacarificación estimado del 98%, fueron: un tiempo de hidrólisis de 48 horas, una relación enzima/sustrato de 0.3 ml/g, una composición del coctel enzimático de 1.6 FPU (Unidades de Papel Filtro) celulasas/UI hemi-celulasas y una composición del sustrato de 7.7 % holo-celulosa / %lignina, el cual se pre-trató a unas condiciones de 130° C por 5 minutos.

**Palabras clave:** Sacarificación, enzimas, holo-celulosa, hojas y cogollos, caña de azúcar.

## 1. Introducción

La biomasa lignocelulósica y, en especial la de subproductos agroindustriales que representa alrededor del 71% de la biomasa total (Simmons, Loque y Blanch, 2008), está dejando de ser producto de desecho para convertirse en materia prima potencial para la producción de bioetanol (Sánchez, Gutiérrez, Muñoz y Rivera, 2010). Su uso permite reducir no sólo el consumo de combustibles fósiles, sino también las emisiones de gases de efecto invernadero (Naik, Goud, Rout & Dalai, 2010).

La biomasa lignocelulósica puede ser convertida a etanol mediante pretratamiento, hidrólisis y fermentación (Kumar, Singh, S & Singh, O., 2008). Sin embargo, estas etapas en la actual producción de etanol, son costosas (Wen, Nair & Zhao, 2009) y por ello se requiere importantes avances técnicos para reducir los costos de producción a un nivel competitivo con la gasolina IEA<sup>1</sup>. La naturaleza recalcitrante de la pared celular de los materiales lignocelulósicos representa el mayor desafío en ese campo. Su mayor componente es la celulosa, la cual es protegida por una matriz formada por hemicelulosa (el segundo componente más abundante) y lignina, que le confiere resistencia al ataque de microorganismos, enzimas y agentes químicos (Aro, Pakula & Penttilä, 2005). El pretratamiento por organosolvente involucra el uso de un líquido orgánico (metanol, etanol, acetona, etileno, glicol o etilenglicol) y agua, con o sin la adición de un agente catalizador (ácido o base). Este proceso hidroliza la lignina y sus enlaces con los carbohidratos, generando un residuo sólido compuesto principalmente por celulosa. Entre más se remueva la lignina, más accesible será la celulosa a la acción de las enzimas DEO (2005) y esto se logra, generalmente, con un pretratamiento a condiciones de operación entre 60 y 80 min y 180° C y 190° C con una remoción de lignina entre el 70% y 80% (Pan, Gilkes, Kadla, Pye, Saka, Gregg et al., 2006; Goh, Tan, Lee & Brosse, 2011). Sin embargo, llevar este proceso a esas condiciones resulta costoso, por lo que algunos autores reportan que se puede bajar la severidad del proceso sin afectar significativamente el rendimiento en la hidrólisis enzimática (Goh et al., 2011; Pan, Xie, Yu, Lam & Saddler, 2007).

La hidrólisis mediante enzimas es una de las etapas utilizadas tradicionalmente en la degradación de la pared celular a azúcares fermentables (Wen et al., 2009) y es una de las dos más costosas del proceso de producción de etanol -junto con el pretratamiento- (Merino & Cherry, 2007) y se debe principalmente a la baja eficiencia catalítica de la enzima (Chen & Qiu, 2010). Una alternativa para mejorarla consiste en usar la sinergia de una mezcla de enzimas con diversas actividades hidrolíticas complementarias (Meyer, Rosgaard & Sørensen, 2009; Wen et al., 2009). En la naturaleza, el mejor ejemplo que explica la sinergia de este conjunto de enzimas degradadoras de la pared celular, es el celulosoma. Éste es un sistema complejo y muy organizado, presente en algunas bacterias anaerobias (Schwarz, 2001), en el cual diversos tipos de enzimas oxidativas como: celulasas, hemicelulasas y pectinasas, actúan en conjunto y catalizan la hidrólisis de la celulosa y hemicelulosa (Bayer, Belaich, Shoham & Lamed, 2004). El uso de este complejo enzimático en la degradación de la biomasa se ha considerado una alternativa promisoría ya que ocasionaría condiciones menos severas de pretratamiento y por ende costos más bajos y reducción de compuestos inhibidores (Galbe & Zacchi, 2007). Las enzimas que hidrolizan la celulosa son las celulasas y se dividen en tres grandes grupos: endoglucanasas, celobiohidrolasas (exoglucanasas) y  $\beta$ -glucosidasas. Las endoglucanasas catalizan enlaces internos de las cadenas de celulosa, mientras que las celobiohidrolasas atacan los enlaces extremos, liberando celobiosa. Las  $\beta$ -glucosidasas son activas sólo sobre celo-oligosacáridos y celobiosa liberando monómeros de glucosa. (Kumar et al. (2008); Schwarz (2001).

La hemicelulosa es un polímero heterogéneo compuesto por pentosas -D-xylosa, D-arabinosa-, hexosas -D-manosa, D-glucosa, D-galactosa- y azúcares ácidos. Hay diversos tipos de enzimas responsables de su degradación -hemicelulasas-, tales como: endo-1,4- $\beta$ -xilanasas,  $\beta$ -xilosidasas,  $\alpha$ -gluconidasas,  $\alpha$ -L-arabinofuranosidasas y acetilxilan esterases, que actúan en la degradación de xilano, arabinano, mannano y galactano. Al igual que la celulosa, la hemicelulosa es una importante fuente de azúcares para la fermentación. (Kumar et al., 2008).

La heterogeneidad física de los sustratos lignocelulósicos, la diversa arquitectura de la pared celular y la complejidad de los sistemas celulolíticos hacen que su estudio no sea simple, y que su utilización sea limitada, como materia prima en la producción de etanol. Esto hace necesario realizar investigaciones que permitan identificar las variables que más afectan el proceso de hidrólisis enzimática, teniendo en cuenta que su eficiencia depende de factores como: las propiedades químicas y físicas del sustrato, el pretratamiento usado (Li, Zheng, Qiu, Cai, Tomberlin, & Yu, 2011; Alvira, Tomás-Pejó, Ballesteros & Negro, 2010), la composición de las enzimas (Salcedo, López y Flórez, 2011), entre otros. Por tal razón, el objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de cuatro variables: tiempo, composición del coctel enzimático,

<sup>1</sup> IEA es una marca mexicana que pertenece al sector de autopartes. *Electric and Electronic Components*.

composición del sustrato y relación coctel enzimático/sustrato, en la hidrólisis de residuos de caña de azúcar -hojas y cogollos- pre-tratados por organosolvente a diferentes condiciones de operación. Estos residuos, en Colombia, representan un problema ya que afectan el rebrote de la caña e impiden las labores del cultivo, como abono y riego. Se estima que se genera entre 9 y 11 millones de toneladas de estos residuos, constituidos principalmente por hojas y cogollos, producto de la cosecha de la caña de azúcar (Asocaña, 2011, p. 102). La quema es una alternativa a este problema, pero, además del impacto ambiental, este material se deja de aprovechar, ya que constituye una fuente lignocelulósica importante (Aguilar, Rodríguez y Castillo, 2010). Su valorización, además de presentar beneficios ambientales, permitiría aumentar la competitividad del sector cañero.

## 2. Metodología

Los residuos de cosecha, compuestos principalmente por hojas y cogollos de caña de azúcar, variedad CC8475 y CC8592, fueron suministrados por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - CENICAÑA. Con el fin de estudiar la influencia de la composición de holocelulosa (celulosa + hemicelulosa) y lignina sobre el proceso de hidrólisis enzimática, se preparó cuatro sustratos de este material, empleando deslignificación por organosolvente a diferentes condiciones de operación (Tabla 1). Este proceso se realizó en un reactor de 6 litros, con una relación sólido/líquido de 1:8 p/v, donde la fase líquida consistió en 45% de etanol y se usó NaOH como catalizador (Mutis, 2009). Posteriormente, el material deslignificado se sometió a lavado con agua por 15 minutos y a secado en horno a 60° C hasta peso constante con el fin de determinar la composición del mismo (celulosa, hemicelulosa, lignina, extractivos, cenizas, humedad) usando el método de Van Soest (1983).

Tabla 1. Condiciones de operación de la deslignificación organosolvente

Sustratos	Temperatura (°C)	Tiempo (mín.)	NaOH (% p/v)
S1	160	120	0,15
S2	160	120	3
S3	130	5	3
S4	120	20	3

Se preparó cinco cocteles enzimáticos de acuerdo con los resultados de Salcedo et al. (2011), que consistieron en diferentes actividades celulolíticas expresadas como unidades de papel filtro (FPU) y hemi-celulolíticas expresadas en Unidades Internacionales (UI). Estos cinco cocteles fueron codificados como E1, E2, E3, E4 y E5 en relación con los niveles de actividades celulolíticas/hemi-celulolíticas, de mayor a menor valor (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre la actividad celulolítica y hemi-celulolítica de cada coctel enzimático

Coctel enzimático	Celulasa FPU/ml	Hemicelulasa Global UI/ml	Celulasas/Hemicelulasas (FPU/UIx10 <sup>-3</sup> )
E1	37	14	264
E2	27.53	52.75	52
E3	18	107	17
E4	9.36	113.14	8.3
E5	0.073	129.4	0.056

Fuente: Adaptado de Salcedo et al. (2011).

Se analizó la incidencia de las variables en la hidrólisis enzimática mediante un diseño experimental factorial multinivel, con cuatro factores: tiempo, composición del sustrato, composición del coctel enzimático y relación coctel enzimático/sustrato (E/S) (Tabla 3), teniendo como variable de respuesta el porcentaje de sacarificación (%S) (Ec. 1) que es un indicador de la conversión de la hidrólisis Ghose (1987).

Tabla 3. Factores experimentales

Factores	Ecuaciones	Unidades	Niveles	Valores
Tiempo	-	horas	6	2, 9, 6, 24, 28 y 48
Composición del sustrato <sup>a</sup>	$\frac{\%Holoceulosa}{\%Lignina}$	-	4	De los resultados (sección 3.1)
Composición del coctel enzimático <sup>b</sup>	$\frac{Celulasa}{Hemicelulasa}$	FPU/UI x 10 <sup>-2</sup>	5	264, 52, 17, 8.3 y 0.056
E/S	-	mL/g	4	0.05, 0.1, 0.2 y 0.3

$$\%S = \frac{\text{Azúcares reductores } \left(\frac{\text{mg}}{\text{ml}}\right) * 0.9 * 100}{\text{Concentración de sustrato } \left(\frac{\text{mg}}{\text{ml}}\right)} \quad (1)$$

La reacción se realizó con soluciones *buffer* acetato a pH 4.8 con una relación sólido/líquido de 6% p/v, a una temperatura de 40 °C y agitación continua. Se tomó muestras a los diferentes tiempos de reacción y se les determinó azúcares reductores por el método de DNS Miller (1959). Adicionalmente se calculó el índice global de hidrólisis (IGH) para cada pareja sustrato-enzima, con el fin de evaluar la capacidad de los cocteles enzimáticos para degradar cada sustrato (Salcedo et al., 2011), mediante el producto del porcentaje de sacarificación promedio (%S) y el índice de sacarificación promedio (IS) (Ec. 2):

$$IGH = \overline{\%S} * \overline{IS} \quad (2)$$

El  $\overline{\%S}$  se calculó a partir del promedio de los porcentajes de sacarificación que resultan de la hidrólisis para cada relación E/S en un tiempo de 28 horas (Ec. 3).

$$\overline{\%S} = \frac{\sum_{i=1}^n \%S_{E/S_i}}{n} \quad (3)$$

donde:

**E/S:** relación enzima/sustrato

**n:** niveles usados de la relación E/S (mg/L), que fueron: E/S<sub>1</sub> (0.05), E/S<sub>2</sub> (0.1), E/S<sub>3</sub> (0.2) y E/S<sub>4</sub> (0.3).

**%S<sub>E/S<sub>i</sub></sub>:** Porcentaje de sacarificación que resultó de la hidrólisis para cada relación E/S en un tiempo de 28 horas.

El  $\overline{IS}$  (Ec. 4) se calculó a partir del promedio de los índices de sacarificación, que resultan al graficar el %S contra la relación E/S (Ec. 5) (Salcedo et al., 2011).

$$\overline{IS} = \frac{\sum_{i=1}^k IS_{t_i}}{k} \quad (4)$$

$$IS = \frac{\Delta \%S}{\Delta (E/S)} \quad (5)$$

donde:

**t:** tiempo de hidrólisis

**k:** niveles de t (horas), que fueron: t<sub>1</sub> (12), t<sub>2</sub> (6), t<sub>3</sub> (9), t<sub>4</sub> (24) y t<sub>5</sub> (28)

**IS<sub>t<sub>i</sub></sub>:** índice de sacarificación para cada t de hidrólisis

**Nota:** estos cálculos fueron hechos hasta las 28 horas ya que los IS perdían linealidad si eran evaluados hasta las 48 horas. El  $r^2$  promedio para los IS a 28 horas fue de 0.95.

Para realizar el análisis de significancia de las variables y obtener los valores de las mismas que conduzcan a maximizar el %S, se normalizó los datos y se usó el software STATGRAPHICS Centurion XV versión 15.2.06.

### 3. Resultados y Discusión

#### 3.1 Caracterización de los sustratos

De acuerdo con la composición química de los sustratos, identificados como S1, S2, S3 y S4, en relación con los niveles descendentes de holocelulosa/lignina (Tabla 4), se observa que el método de deslignificación por organosolvente reduce considerablemente la composición de lignina, comparado con un sustrato sin deslignificar (SD), siendo el sustrato S1 el que presentó la mayor reducción. Estudios de Pan et al. (2007), en donde se usó pino pre-tratado por organosolvente a unas condiciones de 170° C y 60 min, permitieron reducir la composición de lignina en un 60%. En esta investigación se logró reducir la composición de lignina por encima del 50% a unas condiciones menos severas de operación, como es el caso de los sustratos S2 y S4. De manera similar, la composición de hemicelulosa bajó en todos los sustratos estudiados, lo cual indica que este proceso disolvió este componente, presentándose las mayores reducciones cuando se utilizó las condiciones más severas de pre-tratamiento (160° C y 120 min). Este proceso es conocido por dejar el material sólido rico en celulosa, removiendo lignina, productos de degradación de lignina, parte de la hemicelulosa, productos de degradación de azúcares, entre otros (Curreli et al., 1997; Pan et al. (2006).

Aunque es conocido que la remoción o hidrólisis de hemicelulosa facilita la hidrólisis de la celulosa (Xiao et al., 2004; Kabel et al., 2007), en pre-tratamientos como ARP (*ammonia recycle percolation*) y expansión de fibras por amoníaco, donde buena parte de la hemicelulosa no se solubiliza, se puede obtener altas eficiencias en la hidrólisis enzimática (Krishnan, Sousa, Jin, Chang, Dale & Balan, 2010; Kim & Lee, 2005). De manera similar, estudios de Ohgren, Bura, Saddler & Zacchi (2007) en los cuales usaron como sustrato, rastrojo de maíz pre-tratado por explosión con vapor a dos niveles, uno más y otro menos severo, encontraron que la adición de enzimas hemicelulasas incrementó la producción de azúcares (xilosa) obteniendo rendimientos del 70% en el primer sustrato y del 86% en el segundo sustrato, lo cual quiere decir que tanto el contenido de hemicelulosa del sustrato como la adición de enzimas hemicelulolíticas mejora el proceso de hidrólisis. Por ello y en vista de que la hemicelulosa es un azúcar importante, se debe buscar alternativas para evitar la pérdida de este componente.

Tabla 4. Composición química de los sustratos

Sustrato	Condiciones de operación del pretratamiento			Composición de los sustratos (% base seca)						
	T (°C)	t (min)	% NaOH	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina total	Extractivos	Cenizas	Holocelulosa	Holocelulosa/Lignina
SD*	-	-	-	37.36±1.4	34.6±0.81	21.23±0.041	3.95±0.03	1.13±0.4	71.96	3.39
S1	160	120	3	82.6±0.82	7.37±0.057	4.79±10.5	5.06±0.0057	0.22±0.1	89.97	18.78
S2	120	20	3	77.41±1.78	10.36±1.28	6.57±0.05	6.48±0.45	0.55±0.38	87.75	13.38
S3	160	120	0,15	82.35±0.35	3.01±0.05	7.91±0.25	9±0.2	1.4±0.2	85.36	10.79
S4	130	5	3	71.91±1.35	10.88±0.7	10.75±0.37	4.75±0.14	1.60±0.14	82.77	7.70

#### Evaluación de los cocteles enzimáticos

Para todos los sustratos deslignificados, los IGH correspondientes alcanzaron su mayor valor cuando se usó el coctel enzimático E2 (Figura 1), siendo el más alto, el índice obtenido por el sustrato S1, que corresponde al material con mayor grado de deslignificación. Estos resultados son similares a los obtenidos por Salcedo et al. (2011), donde el grado de deslignificación influyó de manera positiva en la hidrólisis al comparar con un sustrato sin deslignificar, cuyo IGH fue mucho menor.

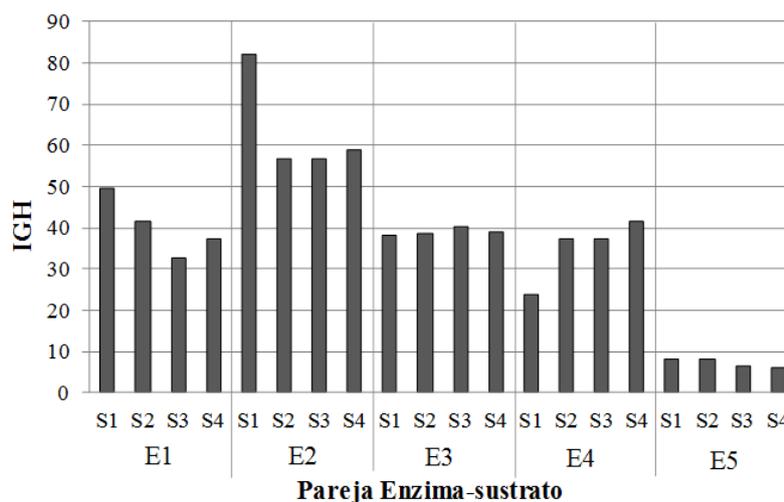


Figura 1. Índice global de hidrólisis para las diferentes combinaciones de sustrato-coctel enzimático.

Por otra parte, el coctel enzimático E5 tuvo los IGH más bajos para todos los sustratos evaluados. Este coctel, que se identificó por tener el nivel más bajo de actividad celulolítica en relación con los otros cocteles evaluados, restringió la producción de azúcares, lo cual es razonable, dadas las altas composiciones de celulosa de los sustratos, que variaron entre el 70 y 82%. El coctel enzimático E1, que se caracterizó por tener la mayor actividad celulolítica, tenía poca actividad hemi-celulolítica, lo cual limitó la hidrólisis de la hemicelulosa y por consiguiente no alcanzó los mayores IGH. Es conocido que la presencia de hemicelulosa inhibe la actividad celulolítica (Xiao et al., 2004) y que la deficiencia de actividades que la degraden puede conducir a la liberación de altas concentraciones de xilo-oligómeros, compuesto conocido por ser un gran inhibidor de actividad celulolítica (Qing, Yang & Wyman, 2010; Qing & Wyman, 2011), lo cual sugiere que la parcial o nula hidrólisis de la hemicelulosa puede restringir la hidrólisis enzimática de la celulosa y por ende es necesaria la adición de actividades hemi-celulolíticas para mejorarla, además porque se ha demostrado que estas enzimas reducen la inhibición de xilo-oligómeros (Qing & Wyman, 2011). Estudios de hidrólisis en residuos de cosecha de caña de azúcar -principalmente hojas- (Krishnan et al., 2010) permitieron corroborar que es importante la adición de enzimas hemi-celulolíticas, lo cual mejoró la conversión de xilano -segundo azúcar más abundante después de la celulosa-, alcanzando valores cercanos al 95%.

La cantidad de lignina presente en el sustrato es también un factor que afecta el proceso de hidrólisis (Mussatto, Fernandes, Milagres & Roberto, 2008); sin embargo, se debe tener en cuenta el tipo de pretratamiento y sus condiciones de operación (Salcedo et al., 2011). Mediante esta investigación se demostró que, utilizando el mismo tipo de pretratamiento pero a diferentes condiciones de operación, se obtuvo similares reducciones de lignina y similares IGH, como es el caso de los sustratos S2 y S3, lo cual sugiere que se puede emplear temperaturas y tiempos más bajos, sin afectar significativamente el contenido de lignina final y el IGH.

### 3.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico ( $R^2 = 83\%$ ) indicó que las variables independientes influyen positivamente sobre el %S. El orden de influencia de las variables fue (de mayor a menor orden de significancia,  $p < 0,05$ ): tiempo, relación E/S, composición del coctel enzimático y composición del sustrato. Este último parámetro se explica debido a que a pesar de que se usó diferentes condiciones de operación en la deslignificación con organosolvente, los IGH no variaron drásticamente (IGS entre 55 y 80) en comparación a como lo hicieron los sustratos empleados por Salcedo et al. (2011), donde se obtuvo IGH entre 2 y 180, una variación bastante amplia para el mismo coctel enzimático (identificado como E2 en el presente artículo y como E5 en el estudio de Salcedo et al. (2011)) y donde se utilizó otros procesos de deslignificación (enzimáticos, químicos y explosión con vapor).

Adicionalmente, la interacción Enzima-Enzima tuvo un efecto negativo bastante significativo que indica que el %S disminuirá a partir de una composición enzimática específica, la cual se encuentra alejada de los valores extremos para esta variable (Figura 2). Esto indica que, efectivamente, las actividades enzimáticas

de celulasas y hemicelulasas actúan en sinergia en la producción de azúcares. Las interacciones tiempo-tiempo y E/S- E/S presentaron efectos negativos muy pequeños, por tanto el %S es ascendente en el rango del experimento para estas variables, lo cual sugiere que se puede emplear tiempos y relaciones E/S mayores con el fin de incrementar el %S, siempre y cuando sean justificables en términos económicos. Se sabe que entre mayor sea el tiempo de reacción y la concentración de la enzima, mayor será la eficiencia de la hidrólisis; no obstante, tiempos por encima de 48 h. pueden no ser significativos (Mooney, Mansfield, Touhy & Saddler, 1998; Yeh, Huang & Chen, 2010) y, además, el uso de grandes concentraciones de enzima tiene efectos negativos en los costos (Gregg, Boussaid & Saddler, 1998).

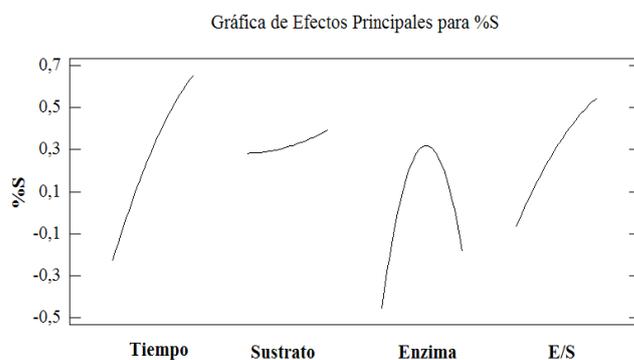


Figura 2. Gráfica de efectos principales para %S.

La mejor combinación estimada de los parámetros, dentro del rango del experimento, fue: tiempo -48 h.-, relación E/S -0.3 ml/g-, composición del coctel enzimático -1.6 FPU celulasas/UI hemicelulasas- y composición del sustrato -18.4 %holocelulosa/%Lignina- con un %S estimado del 100%. Asimismo, el modelo predijo, para la composición del sustrato más baja -S4: 7.7 %holocelulosa/%Lignina- un %S casi igual, del 98%, lo cual quiere decir que se puede emplear sustratos menos deslignificados, producto de condiciones menos severas de pretratamiento -130°C y 5 min.-, sin afectar significativamente el rendimiento. Estudios de Pan et al. (2007) lograron concluir que el rendimiento de la hidrólisis enzimática, se debe, más que al contenido de lignina, al grado de polimerización del sustrato. Entre más alto sea este valor, más largas son las cadenas de celulosa, las cuales forman fuertes enlaces de hidrógeno que limitan la accesibilidad de la celulosa a las enzimas (Puri, 1984). Se deberá realizar mayores estudios en este campo sobre residuos de cosecha de la caña de azúcar, a fin de obtener una conclusión precisa al respecto. Adicionalmente, estudiosos del tema como Krishnan et al. (2010), quienes evaluaron hidrólisis enzimática usando celulasas y hemicelulasas sobre residuos de cosecha de caña de azúcar, lograron obtener porcentajes de conversión de aproximadamente 90% en 72 horas; por ende, los efectos del presente trabajo resultan ser prometedores y se deberá focalizar mayores esfuerzos en el estudio de costos y factibilidad del uso de estos parámetros.

#### 4. Conclusiones

Todas las variables estudiadas -tiempo, relación E/S, composición del coctel enzimático y composición del sustrato- presentaron efectos significativos - $p < 0,05$ - positivos sobre el %S. Las variables tiempo -48 h- y relación E/S -0.3 ml/g- fueron las más significativas. Se recomienda llevar a cabo la hidrólisis a valores por encima de los evaluados en el presente estudio, ya que su efecto es positivo en todo el rango experimental y todavía no se ha llegado a un máximo para estas variables. Debe también tenerse en cuenta el costo, si se llegase a obtener dichos máximos, con el fin de hacer un balance costo-beneficio.

Las diferentes composiciones de los sustratos evaluados, producto de las diferentes condiciones de operación de este proceso, variaron significativamente poco en relación con los otros parámetros evaluados -tiempo, relación E/S y composición del coctel enzimático-; por lo tanto, sustratos pre-tratados con organosolvente que resulten en contenidos de lignina por debajo del 10%, no afectarán significativamente la eficiencia de la hidrólisis enzimática; de esta manera puede usarse condiciones de operación no tan severas en el pretratamiento -130°C y 5 min-. Se recomienda evaluar el pretratamiento no sólo con la composición de celulosa, hemicelulosa y lignina, sino también por el grado de polimerización, que es un parámetro que también afecta el proceso de hidrólisis.

Las actividades celulasas y hemicelulasas actúan en sinergia en la producción de azúcares, siendo la enzima E2, con una composición de 0,52 FPU de celulasas/UI de hemicelulasas, la que produjo el mayor IGH dentro de las enzimas evaluadas. El análisis estadístico arrojó un valor para esta variable, de 1.5 FPU de celulasas/UI de hemicelulasas, como el más adecuado para la hidrólisis, lo cual es congruente, teniendo en cuenta que los sustratos estudiados presentaron mayor contenido de celulosa que de hemicelulosa. Aunque es evidente que existe sinergia entre las actividades celulolíticas y hemi-celulolíticas de las enzimas, este factor tiene un menor efecto que las variables tiempo de hidrólisis y relación E/S, lo cual quiere decir que su uso dependerá más del balance costo-beneficio. Para posteriores estudios, se recomienda evaluar el uso de 2 etapas de hidrólisis enzimática, la primera usando las enzimas hemi-celulolíticas, seguida de la segunda etapa donde se usa las celulolíticas, como lo reportan estudios de Koukiekolo, Cho, Kosugi, Inui, Yukawa & Doi (2005).

## Bibliografía

- Aguilar, N., Rodríguez, D. & Castillo, A. (2010). Azúcar, co-productos y sub-productos en la diversificación de la agroindustria de la caña de azúcar. *Revista Virtualpro*, (106), 1-28. Colombia: Grupo INGC.
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M. & Negro, M. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresource Technology*, 101(13), 4851-4861. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409015983>
- Aro, N., Pakula, T. & Penttilä, M. (2005). Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi. *FEMS Microbiology Reviews*, 29, 719-739. Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/j.femsre.2004.11.006/abstract>
- Asocaña, Asociación de cultivadores de caña de azúcar de Colombia. (2011). *Informe Anual 2010 - 2011*. Cali, Colombia.
- Bayer, E., Belaich, J., Shoham, Y. & Lamed, R. (2004). The cellulosomes: multienzyme machines for degradation of plant cell wall polysaccharides. *Annual Review of Microbiology*, 58, 521-554. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15487947>
- Chen, H., & Qiu, W. (2010). Key technologies for bioethanol production from lignocellulose. *Biotechnology Advances*, 28(5), 556-562. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073497501000056X>
- Curreli, N., Fadda, M., Rescigno, A., Rinaldi, A., Soddu, G., Sollai, F. et al. (1997). Mild alkaline/oxidative pretreatment of wheat straw. *Process Biochemistry*, 32(8), 665-670. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032959297000204>
- Galbe, M. & Zacchi, G. (2007). Pretreatment of lignocellulosic materials for efficient bioethanol production. *Biofuels. Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, Vol. 108, pp. 41-65. Recuperado de: [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10\\_2007\\_070](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10_2007_070)
- Goh, C., Tan, H., Lee, K. & Brosse, N. (2011). Evaluation and optimization of organosolv pretreatment using combined severity factors and response surface methodology. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 4025-4033. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953411003588>
- Gregg, D., Boussaid, A. & Saddler, J. (1998). Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresource Technology*, 63(1), pp. 7-12. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085249700103X>
- Kabel, M., Bos, G., Zeevalking, J., Voragen, A. & Schols, H. (2007). Effect of pretreatment severity on xylan solubility and enzymatic breakdown of the remaining cellulose from wheat straw. *Bioresource Technology*, 98(10), 2034-42. Recuperado de: [http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/17029957/Effect\\_of\\_pretreatment\\_severity\\_on\\_xylan\\_solubility\\_and\\_enzymatic\\_breakdown\\_of\\_the\\_remaining\\_cellulose\\_from\\_wheat\\_straw\\_](http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/17029957/Effect_of_pretreatment_severity_on_xylan_solubility_and_enzymatic_breakdown_of_the_remaining_cellulose_from_wheat_straw_)
- Kim, T. & Lee, Y. (2005). Pretreatment and fractionation of corn stover by ammonia recycle percolation process. *Bioresource Technology*, 96(18), 2007-2013. Recuperado de: [http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/16112488/Pretreatment\\_and\\_fractionation\\_of\\_corn\\_stover\\_by\\_ammonia\\_recycle\\_percolation\\_process\\_](http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/16112488/Pretreatment_and_fractionation_of_corn_stover_by_ammonia_recycle_percolation_process_)
- Koukiekolo, R., Cho, H., Kosugi, A., Inui, M., Yukawa, H. & Doi, R. (2005). Degradation of corn fiber by *Clostridium cellulovorans* cellulases and hemicellulases and contribution of scaffolding protein CbpA. *Applied and Environmental Microbiology*, 71(7), 3504-3511. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16000754>
- Krishnan, C., Sousa, C., Jin, M., Chang, L., Dale, B. & Balan, V. (2010). Alkali-based AFEX pretreatment for the conversion of sugarcane bagasse and cane leaf residues to ethanol. *Biotechnology and Bioengineering*, 107(3), 441-50. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20521302>
- Kumar, R., Singh, S. & Singh, O. (2008). Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 35(5), 377-391. Recuperado de: <http://link.springer.com/journal/10295>

- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J. & Yu, Z. (2011). Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste Management*, 31(6), 1316-20. Recuperado de: [http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/21367596/Bioconversion\\_of\\_dairy\\_manure\\_by\\_black\\_soldier\\_fly\\_\\_Diptera:\\_Stratiomyidae\\_\\_for\\_biodiesel\\_and\\_sugar\\_production\\_](http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/21367596/Bioconversion_of_dairy_manure_by_black_soldier_fly__Diptera:_Stratiomyidae__for_biodiesel_and_sugar_production_)
- Merino, S. & Cherry, J. (2007). Progress and Challenges in Enzyme Development for Biomass Utilization. *Biofuels* (pp. 95-120). Springer Berlin / Heidelberg. Recuperado de: [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10\\_2007\\_066](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10_2007_066)
- Meyer, A., Rosgaard, L. & Sørensen, H. (2009). The minimal enzyme cocktail concept for biomass processing. *Journal of Cereal Science*, 50(3), 337-344. Recuperado de: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-85fa80e3-b4f2-3fbb-a439-bafb3cc660>
- Mooney, C., Mansfield, S., Touhy, M. & Saddler, J. (1998). The effect of initial pore volume and lignin concentration on the enzymatic hydrolysis of softwoods. *Bioresource Technology*, 64(2), 113-119. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852497001818>
- Mussatto, S., Fernandes, M., Milagres, A. & Roberto, I. (2008). Effect of hemicellulose and lignin on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain. *Research Gate*. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/222133292\\_Effect\\_of\\_hemicellulose\\_and\\_lignin\\_on\\_enzymatic\\_hydrolysis\\_of\\_cellulose\\_from\\_brewer%27s\\_spent\\_grain](http://www.researchgate.net/publication/222133292_Effect_of_hemicellulose_and_lignin_on_enzymatic_hydrolysis_of_cellulose_from_brewer%27s_spent_grain)
- Mutis, D. (2009). *Deslignificación de residuos de la caña de azúcar (hojas y cogollos) con procesos químicos*. (Tesis de pregrado). Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Naik, S., Goud, V., Rout, P. & Dalai, A. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597. Recuperado de: [http://users.auth.gr/~akontses/%CE%A4%CE%A0%CE%A0\\_biofuels/Production%20of%20first%20and%20second%20generation%20biofuels.pdf](http://users.auth.gr/~akontses/%CE%A4%CE%A0%CE%A0_biofuels/Production%20of%20first%20and%20second%20generation%20biofuels.pdf)
- Ohgren, K., Bura, R., Saddler, J. & Zacchi, G. (2007). Effect of hemicellulose and lignin removal on enzymatic hydrolysis of steam pretreated corn stover. *Research Gate*. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/publication/6683669\\_Effect\\_of\\_hemicellulose\\_and\\_lignin\\_removal\\_on\\_enzymatic\\_hydrolysis\\_of\\_steam\\_pretreated\\_corn\\_stover](http://www.researchgate.net/publication/6683669_Effect_of_hemicellulose_and_lignin_removal_on_enzymatic_hydrolysis_of_steam_pretreated_corn_stover)
- Pan, X., Gilkes, N., Kadla, J., Pye, K., Saka, S., Gregg, D. et al. (2006). Bioconversion of Hybrid Poplar to Ethanol and Co-Products Using an Organosolv Fractionation Process : Optimization of Process Yields. *Biotechnology*, 94(5), 851-861. Recuperado de: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)
- Pan, X., Xie, D., Yu, R., Lam, D. & Saddler, J. (2007). Pretreatment of Lodgepole Pine Killed by Mountain Pine Beetle Using the Ethanol Organosolv Process: Fractionation and Process Optimization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(8), 2609-2617. Recuperado de: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie061576l>
- Puri, V. (1984). Effect of crystallinity and degree of polymerization of cellulose on enzymatic saccharification. *Biotechnology and Bioengineering*, 26(10), 1219-22. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18551639>
- Qing, Q., Yang, B. & Wyman, C. (2010). Xylooligomers are strong inhibitors of cellulose hydrolysis by enzymes. *Unbound Medline*. Recuperado de: [http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/20708404/Xylooligomers\\_are\\_strong\\_inhibitors\\_of\\_cellulose\\_hydrolysis\\_by\\_enzymes\\_](http://www.unboundmedicine.com/medline/citation/20708404/Xylooligomers_are_strong_inhibitors_of_cellulose_hydrolysis_by_enzymes_)
- Qing, Q. & Wyman, C. (2011). Hydrolysis of different chain length xylooligomers by cellulase and hemicellulase. *Bioresource Technology*, 102(2), 1359-1366. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20943381>
- Salcedo, J., López, J. y Flórez, L. (2011). Evaluación de enzimas para la hidrólisis de residuos (Hojas y cogollos) de cosecha de caña de azúcar. *Dyna* 78(169), 182-190. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Schwarz, W. (2001). The cellulosome and cellulose degradation by anaerobic bacteria. *Applied Microbiology Biotechnology*, 56(5-6), 634-649. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007%2F5002530100710>

- Simmons, B., Loque, D. & Blanch, H. (2008). Next-generation biomass feedstocks for biofuel production. *Genome Biology*, 9(12), 242. Recuperado de: <http://www.genomebiology.com/2008/9/12/242>
- Sánchez, A., Gutiérrez, A., Muñoz, J. y Rivera, C. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. Ibagué, Colombia: *Revista Tumbaga*, 5, 61-91.
- Van Soest, P. J. (1983). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. I. Preparation of fiber residues of low nitrogen content. *Journal of the AOAC*, 46(5), 829-835.
- Wen, F., Nair, N. & Zhao, H. (2009). Protein engineering in designing tailored enzymes and microorganisms for biofuels production. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(4), 412-419. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2763986/>
- Xiao, Z., Zhang, X., Gregg, D. & Saddler, J. (2004). Effects of sugar inhibition on cellulases and beta-glucosidase during enzymatic hydrolysis of softwood substrates. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 113-116(1-3), 1115-1126. Recuperado de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15054257>
- Yeh, A., Huang, Y. & Chen, S. (2010). Effect of particle size on the rate of enzymatic hydrolysis of cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 79(1), 192-199. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861709004135>



# Aplicación de un Sistema de Laguna Algal de alta tasa para el tratamiento de lixiviados

Víctor Alfonso Cerón Hernández

Biólogo,

MSc. en Ingeniería Sanitaria y Ambiental,  
Estudiante del Doctorado en Ciencias Ambientales.  
Universidad del Valle y Universidad Nacional.

vicalce@gmail.com

## Resumen

La generación de lixiviados que se da en los rellenos sanitarios, contribuye al deterioro de la calidad del recurso hídrico disponible para el consumo humano, riego, actividades industriales, entre otros usos. Su producción tiende a aumentar debido al crecimiento acelerado y desorganizado de la población urbana y su poca cultura de reciclaje. Con el fin de reducir la contaminación que producen los lixiviados de relleno sanitario se diseñó y construyó un sistema algal de alta tasa –LAAT- que recibía un caudal promedio de  $0,15 \text{ m}^3\text{d}^{-1}$  proveniente de un humedal de flujo sub-superficial que trataba lixiviados del relleno sanitario Presidente, ubicado en el departamento del Valle del Cauca, Colombia. En la laguna algal se monitoreó variables fisicoquímicas como pH, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Oxido-reducción (PotRedox) empleando una sonda multiparamétrica WTW Modelo 340i, tres veces por semana. Así mismo, semanalmente se determinó COD (Carbono Orgánico Disuelto), Alcalinidad, Fosfatos ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ), DQO total y filtrada (Demanda Química de Oxígeno), NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl),  $\text{N-NH}_4$  (Nitrógeno Amoniacal),  $\text{N-NO}_3$  (Nitratos) y Cromo IV ( $\text{Cr}^{+6}$ ); éste último, una vez al mes, durante el periodo de Enero-Julio de 2013.

Según el análisis de las variables físicas, el sistema se comportó como un sistema aerobio, presentando todas las condiciones para que se genere fotooxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos, alcanzando concentraciones de oxígeno disuelto, superiores a  $20 \text{ mgL}^{-1}$ , niveles de pH superiores a 8 y potenciales redox superiores a 300 mV. Por otro lado el sistema algal de alta tasa presentó una buena eliminación de NTK filtrado,  $\text{N-NH}_4$  Filtrada y Nitratos con 38.4 %, 36.7 % y 25 % en carga aplicada, respectivamente. El ortofosfato ( $\text{P-PO}_4^{2-}$ ) por su parte, presentó una eliminación del 8,2%, siendo alta, según los reportes para esta clase de sistemas. En términos de materia orgánica se obtuvo una eficiencia de eliminación de 71% en  $\text{DBO}_5$  y 31.5% de DQO filtrada. En conclusión, el sistema de laguna algal de alta tasa posterior a un tratamiento biológico de lixiviados, puede mejorar la calidad de los lixiviados tratados en rellenos sanitarios, presentando unas adecuadas eficiencias de eliminación de contaminantes como materia orgánica, nutrientes y Cr VI).

**Palabras clave:** Laguna algal de alta tasa, lixiviados, microalgas y  $\text{CO}_2$ .

## 1. Introducción

La mala disposición de los residuos sólidos, la lluvia, el manejo inadecuado del relleno sanitario, entre otros factores, favorecen la producción de lixiviados, los cuales son un agua residual compleja generada cuando el contenido de humedad o agua de los residuos sólidos del relleno es mayor a la capacidad de campo del sitio del relleno (Lin & Chang, 2000; Wiszniowski, Robert, Surmacz-Gorska, Miksch & Weber, 2006; Renou, Givaudan, Poulain, Dirassouyan & Moulin, 2007; Ahmed & Lan, 2012). La presencia de agua permite una combinación de procesos físicos, químicos y microbiológicos para transferir contaminantes del residuo sólido al líquido, resultando así la formación del lixiviado (Lei, Shen, Huang & Wang, 2007). Este residuo sin tratamiento contribuye al deterioro de la calidad de los cuerpos hídricos, además de ser de gran riesgo para la salud de la población. El volumen de este líquido tiende a aumentar debido a varios factores, entre ellos el crecimiento acelerado y desorganizado de la población urbana, la cual aporta más residuos sólidos, las lluvias y la acumulación de lixiviados, por falta de un tratamiento adecuado. Además de estos, factores técnicos como un mal manejo del relleno sanitario, mala compactación, tipo de residuo enterrado y un terreno inadecuado (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD, 2011).

Para intentar mitigar los efectos negativos de los lixiviados se ha propuesto alternativas tecnológicas para su tratamiento, como los humedales construidos, las lagunas de estabilización y algales, siendo la actividad biológica, el principio fundamental para el tratamiento, donde se da una simbiosis entre bacterias y microalgas, lo cual permite la eliminación de diversos contaminantes como metales pesados, nutrientes, materia orgánica, algunos compuestos xenobióticos y otros contaminantes. Así mismo, es posible el mejoramiento en las condiciones fisicoquímicas generales del agua, antes de ser vertida a una fuente receptora (Rawat, Kumar, Mutanda & Bux, 2011). En este orden de ideas, el sistema de laguna algal de alta tasa presenta ventajas tales como: no generar contaminación adicional, ya que la biomasa puede ser cosechada, permitiendo un efectivo reciclaje de nutrientes (Peña, Palacios y Ospina-Álvarez, 2005; Day, Benson & Fleck, 1999), ser de bajo costo, y no requerir de equipos complejos para su funcionamiento y mantenimiento (Craggs, Sutherland & Campbell, 2012); se puede utilizar como un sistema que captura CO<sub>2</sub>; la biomasa de algas producidas y cosechadas a partir de estos sistemas se podría convertir a través de diversos métodos en biocombustibles (Park & Craggs, 2011).

Las algas involucradas en estos sistemas biológicos son utilizadas para la biorremediación de contaminantes, empleando configuraciones como las lagunas algales de alta tasa, que proporcionan las mejores condiciones en la estabilización de aguas residuales domésticas, industriales y lixiviados, pues la fotosíntesis como principal proceso biológico de las algas, produce oxígeno, que es a su vez utilizado para la actividad de transformación/degradación bacteriana (Craggs, Davies-Colley, Tanner & Sukias, 2002). Adicional a la opción de un tratamiento, también contribuyen en la mitigación de los efectos producidos por el exceso de CO<sub>2</sub> en la atmosfera. Se estima que para el 2009 fueron emitidas 5,505.2 millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> a la atmosfera en promedio (*Environmental Protection Agency, EPA, 2011*), lo que representó aproximadamente el 68% del total de emisiones de gases de efecto invernadero producidas antropogénicamente (Ho, Chen, Lee & Chang, 2011). Seguramente esa cifra irá en aumento con el crecimiento de la población mundial que supera los 7000 millones de habitantes (Crossette, UNFPA, 2011).

## 2. Desarrollo

Se denomina sistemas de algal de alta tasa por la mejora en el rendimiento o productividad en la biomasa y en la capacidad de tratamiento de aguas residuales. En éste, la fotosíntesis es un proceso fundamental, en donde las algas verdes y cianobacterias reducen el CO<sub>2</sub> a expensas del agua con la energía solar capturada por los pigmentos clorofílicos. Con base en estos conceptos se diseñó y construyó un sistema algal de alta tasa que recibía una carga volumétrica de 6.5 gr m<sup>-3</sup>.d<sup>-1</sup> y un caudal promedio de 0,1 m<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup> provenientes de un acople tecnológico (Laguna anaerobia de alta tasa + Humedal de Flujo Sub-superficial) para el tratamiento de lixiviado de relleno sanitario.

En este sistema se monitoreó variables fisicoquímicas como pH, Oxígeno Disuelto (OD), Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Oxido-reducción (PotRedox) empleando una sonda multiparamétrica WTW Modelo 340i. La Clorofila *a* se determinó empleando un Fluorometro AquaFluorTMTuner y se estableció la productividad en biomasa. Así mismo, semanalmente se determinó COD (Carbono Orgánico Disuelto), Alcalinidad, Fosfatos (PO<sub>4</sub>-P), DQO total y filtrada (Demanda Química de Oxígeno), NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl), N-NH<sub>4</sub> (Nitrógeno Amoniacal), N-NO<sub>3</sub> (Nitratos) y Cromo IV (Cr<sup>+6</sup>) durante el periodo de Enero-Julio de 2013.

El potencial de Fijación de CO<sub>2</sub> de las algas se determinó mediante balances de masa. Por otro lado, se determinó hasta la tasa más específica posible, las células algales establecidas, empleando técnicas de microscopía clásica (Taxonomía) y métodos moleculares (DGGE y Secuenciación). Para el análisis de los datos recolectados durante el periodo de muestreo se empleó un test de Friedman y el Test de Wilcoxon, para analizar los Flux de gas y las concentraciones de entrada y salida del Cromo VI. Según el análisis de las

variables físicas, el sistema se comportó como un sistema aerobio, presentando todas las condiciones para que se generara una fotooxidación de los compuestos orgánicos e inorgánicos, alcanzando concentraciones de oxígeno disuelto, superiores a  $20 \text{ mgL}^{-1}$ , niveles de pH superiores a 8 y potenciales redox superiores a 300 mV.

Estas condiciones permitieron un crecimiento algal similar a lo reportado por otros sistemas, alcanzando una productividad de  $7.2 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  de biomasa algal, valor que puede considerarse alto, considerando que la unidad estaba tratando lixiviado de relleno sanitario. Por otro lado, el sistema algal de alta tasa, presentó una buena eliminación de NTK filtrado,  $\text{N-NH}_4$  filtrado y Nitratos con 38.4 %, 36.7 % y 25 % en carga aplicada, respectivamente. El ortofosfato ( $\text{P-PO}_4^{3-}$ ) por su parte, presentó una eliminación del 8,2%, siendo alta según los reportes para esta clase de sistemas. En términos de materia orgánica el biorreactor obtuvo una eficiencia de eliminación de 71% en  $\text{DBO}_5$  y 31.5% de DOQ filtrada. La cantidad de carbono fijado por las algas a través de la fotosíntesis en el reactor durante el tiempo de la experimentación, fue de  $26.1 \text{ g de C d}^{-1}$  y  $-18.1 \text{ g de C. d}^{-1}.\text{m}^{-2}$ , valores similares a los reportados por otros estudios.

Mediante el Test de Friedman se encontró diferencias significativas en las variables como materia orgánica (COD, DQOF) y nitrógenos (NTK, NTKF,  $\text{N-NH}_4$ ,  $\text{N-NO}_3$ ), dado que el valor-p es menor que 0.05, siendo la entrada la que más diferencias tenía con respecto a los demás puntos de muestreo, comprobando así que el sistema algal de alta tasa realizó una transformación de los contaminantes. Así mismo hubo diferencias relevantes ( $p\text{-valor} < 0.05$ ) en los flux diurnos y nocturnos, demostrando estadísticamente que el sistema tiene dos comportamientos en términos del  $\text{CO}_2$ , el cual depende de la luz solar.

Respecto al cromo hexavalente, la laguna alcanzó una eliminación superior al 80% y diferencias significativas ( $p\text{-valor} < 0.05$ ) en las concentraciones de este metal en la entrada y salida del sistema, al presentarse una mayor concentración a la entrada del sistema. Esta eliminación o retención del Cromo hexavalente se pudo haber presentado por procesos mediados por la actividad fotosintética y microorganismos presentes mediante adsorción física, intercambio de iones y quimisorción, precipitación química, reacciones redox o cristalización en la superficie celular, entre otros mecanismos. En lo relacionado con la identificación de organismos algales y bacterias del sistema, se halló 16 especies algales diferentes; de éstas, 10 pertenecen a la Clase Chlorophyceae, dos a la Chlamydomonadales y dos a la Cryptophyceae.

De estas especies, se encontró que para *Chilomonas insignis* y *Chroomonas coerulea*, no existen reportes científicos de la presencia de estos organismos en este tipo de unidades tratando aguas residuales. Por otro lado, se determinó la presencia de bacterias pertenecientes a consorcios de oxidadoras de Nitritos y Amonio, las cuales guardan una posible relación comensalista con los grupos algales en el sistema. En conclusión, a pesar de que se trató de un residuo muy complejo y heterogéneo como lo es el lixiviado de relleno sanitario, el sistema algal de alta tasa operó durante el periodo del estudio sin grandes inconvenientes, presentado unas adecuadas eficiencias de eliminación de contaminantes (materia orgánica, nutrientes, Cr VI) y aportando grandes beneficios con la bio-fijación de  $\text{CO}_2$ .

### 3. Conclusiones

A pesar de la complejidad y heterogeneidad de los lixiviados de relleno sanitario, el sistema de laguna algal de alta tasa trató este residuo alcanzando un desempeño satisfactorio al eliminar materia orgánica, nutrientes y un metal pesado (Cromo VI).

El sistema algal de alta tasa, se comportó en horas diurnas como sumidero de carbono, el cual depende de la cantidad de luz disponible (radiación solar) y de la concentración de algas en la superficie. Fijación de  $\text{CO}_2$  de  $26.1 \text{ g de C d}^{-1}$ .

La biofijación de  $\text{CO}_2$  en el sistema LAAT mostró ser una excelente alternativa para el manejo de este gas generado en otras unidades anaerobias de tratamiento, permitiendo cerrar ciclos energéticos y disminuir la huella de carbono de la planta, o al menos hacerla neutra.

La actividad algal se da principalmente entre las 10 y 16 horas, disminuyendo cuando la luz solar se atenúa, lo que implica un tiempo de actividad fotosintética neto de 5 a 6 horas al día.

El sistema LAAT presentó un desempeño adecuado en eliminación de contaminantes expresado en  $\text{DQO}_{\text{filtrada}}$  y  $\text{DBO}_{5\text{filtrada}}$ , del orden del 31.53 y 71%, respectivamente. Así mismo, porcentajes de eliminación de nutrientes en términos de NTK filtrado,  $\text{N-NH}_4$  filtrado y  $\text{N-NO}_3$  del 38.45, 36.74 y 25%, respectivamente.

La productividad de algas alcanzada en el sistema piloto fue de  $7.22 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$  y  $37.15 \text{ g.m}^{-3}.\text{día}^{-1}$ , permite establecer la posibilidad de un aprovechamiento de esta biomasa algal para la obtención de metabolitos secundarios y la generación de biocombustibles, o su uso como alimento para otros animales, como ganado vacuno o peces.

## Bibliografía

- Ahmed, F. & Lan, C. (2012). Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review. *Desalination*, 287, 41–54. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411010320>
- Craggs, R., Davies-Colley, R., Tanner, C. & Sukias, J. (2002). Advanced pond system: performance with high rate ponds of different depths and areas. *Water Science & Technology* 48(2), pp 259–267 © IWA Publishing 2003. Recuperado de: <http://www.iwaponline.com/wst/04802/wst048020259.htm>
- Craggs, R., Sutherland, D. & Campbell, H. (2012). Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production. *Journal of Applied Phycology*, 24(3), 329–337. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10811-012-9810-8>
- Crossette, B. UNFPA. (2011). 7 mil millones de personas, su mundo, sus posibilidades. Recuperado de: [http://foweb.unfpa.org/SWP2011/reports/SP-SWOP2011\\_Final.pdf](http://foweb.unfpa.org/SWP2011/reports/SP-SWOP2011_Final.pdf)
- Day, J., Benson, E. & Fleck, R. (1999). In vitro culture and conservation of microalgae: applications for aquaculture, biotechnology and environmental research. *Society for In Vitro Biology*, 35, 127–136. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007/s11627-999-0022-0>
- Environmental Protection Agency. (2011). *INVENTORY OF U.S. GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND SINKS: 1990 – 2009. Environmental Protection* (pp. 1990 – 2009).
- Ho, S., Chen, C., Lee, D. & Chang, J. (2011). Perspectives on microalgal CO<sub>2</sub>-emission mitigation systems — A review. *Biotechnology Advances*, 29(2), 189–198. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975010001412>
- Lei, Y., Shen, Z., Huang, R. & Wang, W. (2007). Treatment of landfill leachate by combined aged-refuse bioreactor and electro-oxidation. *Water Research*, 41, 2417–2426. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135407001601>
- Lin, S. & Chang, C. (2000). Treatment of landfill leachate by combined electro-fenton oxidation and sequencing batch reactor method. *Science*, 34(17), 4243–4249.
- Park, J. & Craggs, R. (2011). Algal production in wastewater treatment high rate algal ponds for potential biofuel use. *Water Science & Technology*, 63(10), 2403–2410. Recuperado de: <http://www.iwaponline.com/wst/06310/wst063102403.htm>
- Peña, E. Palacios, M. y Ospina-Alvarez, N. (2005). *Algas como indicadoras de contaminación*. Programa Editorial Universidad del Valle. Cali, Colombia.
- Rawat, I., Kumar, R., Mutanda, T. & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae : Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261910004885>
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F. & Moulin, P. (2007). Landfill leachate treatment: review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150, 468–493. Recuperado de: [http://www.researchgate.net/profile/Philippe\\_Moulin3/publication/5849948\\_Landfill\\_leachate\\_treatment\\_Review\\_and\\_opportunity/links/oc960517d21f3b2f85000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Philippe_Moulin3/publication/5849948_Landfill_leachate_treatment_Review_and_opportunity/links/oc960517d21f3b2f85000000.pdf)
- Wiszniewski, J., Robert, D., Surmacz-Gorska, J., Miksch, K. & Weber, J. (2006). Landfill leachate treatment methods: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 4(1), 51–61. Recuperado de: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10311-005-0016-z>





# Operación dinámica de sistemas para alcanzar intensificación de procesos

**Oscar Andrés Prado Rubio**

Ingeniero Químico; M.Eng. Automatización Industrial; Ph.D. Ingeniería Química y Bioquímica; Postdoctorado en sistemas de Filtración Dinámicos; profesor asociado Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Correo electrónico: [oaprador@unal.edu.co](mailto:oaprador@unal.edu.co)

## Resumen

La mejora continua de los procesos químicos y bio-químicos es una necesidad en un mercado globalizado cada vez más exigente desde los puntos de vista económico, técnico y social. En la siguiente contribución se hace una introducción a los procesos intensificados, ilustrando como está filosofía de diseño y operación de procesos puede cambiar los paradigmas actualmente establecidos. En particular, se hace énfasis en un caso de estudio en donde se ha intensificado procesos mediante integración de un bio-reactor con sistemas de membrana dinámicos. En esta área de operación de procesos intensificados, se requieren esfuerzos tanto teóricos como experimentales para determinar su operabilidad idónea. A través de investigaciones, se evidencian los retos que el diseño de procesos intensificados impone sobre la operabilidad del mismo, como consecuencia de la alta interacción entre fenómenos y complejidad de los modelos. Los resultados obtenidos muestran el potencial de tecnologías intensificadas y que aún hay oportunidades de mejoramiento tanto en el diseño como en su forma de operación.

**Palabras clave:** Intensificación procesos, bioreactores con membranas, operabilidad de procesos intensificados.

## 1. Introducción

Continuamente los sistemas de procesamiento requieren ser optimizados con el fin de ser más competitivos en un mercado globalizado que exige reducciones en costos operativos, consumo energético, huella de planta e impacto ambiental, mientras se maximizan productividades, potencial económico y seguridad de planta. En muchos casos, se ha evidenciado que tecnologías convencionales han alcanzado un punto de madurez en donde optimización de condiciones de operación no logran cambios substanciales en índices de desempeño. Es entonces donde se requiere un avance tecnológico conocido como salto cuántico “*Quantum leaps*” (Gerven y Stankiewicz, 2009). En ingeniería de procesos, una estrategia para lograr estos cambios la brinda la intensificación de procesos. Metodologías para la intensificación de procesos proponen reformular sistemas desde nivel molecular hasta macroescalas mediante integración de principios de estructura, termodinámicos, funcionales y temporales. Como resultado, se obtienen diseños novedosos de operaciones y procesos unitarios así como también formas alternativas de operación de los mismos [Gerven y Stankiewicz, 2009; Suk y Matsuura, 2006]. Se espera que los cambios drásticos en el procesamiento a nivel industrial mejoren la sostenibilidad y competitividad de las industrias a futuro.

En esta contribución se muestra a través un caso de estudio particular, el potencial y retos de la intensificación de procesos sobre la operabilidad de los mismos. Factores importantes para sopesar al momento de considerar diseños o formas de operación alternativos dentro de la intensificación de procesos.

## 2. Intensificación de procesos con membranas

Intensificación de procesos (PI) hace referencia los esfuerzos en diseño y desarrollo enfocados en proporcionar mejoras dramáticas un proceso mediante la adicción o mejora de fenómenos. Dentro de los principios de intensificación de procesos se encuentran (Gerven y Stankiewicz, 2009):

- Integración de operaciones/procesos unitarios: operaciones y procesos híbridos.
- Integración de funciones: introducir características nuevas en procesos.
- Mejora selectiva de un fenómeno: sobrepasar los cuellos de botella.
- Integración de fenómenos: generación de nuevas familias de procesos y operaciones.

Utilizando estos principios, se permite intensificación de equipos (procesos u operaciones unitarias) o métodos (reactores multifuncionales, separaciones híbridas, uso de fuentes de energía alternativas, entre otros) (Stankiewicz y Moulijn, 2000). A través de la intensificación de procesos se espera lograr una reducción en tamaño de equipos, disminución del número de unidades necesarias para una operación, incremento de capacidad de producción, minimización del consumo energético (OPEX), incremento en la seguridad del proceso, minimización en generación de residuos, entre otros.

Particularmente, la tecnología de membranas, cumple con los requerimientos que la intensificación de procesos demanda. Las membranas pueden acoplar varias funciones, como de separación y reacción; mejorar los tiempos de contacto; mejorar condiciones hidrodinámicas al permitir la separación física de fases mientras permite la transferencia de masa entre ellas; desplazar condiciones de equilibrio para favorecer separaciones o reacciones; y otra serie más de aplicaciones que son relativamente abundantes en la literatura (Suk y Matsuura, 2006).

A pesar de ser una tecnología prometedora en el ámbito de intensificación de procesos, identificar y/o desarrollar procesos intensificados utilizando membranas no es una tarea simple. Las herramientas disponibles en la literatura permiten principalmente el análisis comparativo de procesos propuestos con otros ya existentes. Dichas técnicas de comparación están basadas en análisis económicos, de recuperación, energéticos, de exergía, entre otros.

La principal limitación de la intensificación de procesos usando tecnología de membranas es que no se cuentan tanto con metodologías como herramientas que permitan diseñar sistemáticamente nuevos

procesos sin recurrir a experimentación (previa o de verificación). Por ende, aún se requieren refinar y desarrollar metodologías basadas en modelos para un diseño y análisis, que permitan identificar y seleccionar posibles procesos intensificados, especialmente no existentes (Stankiewicz y Moulijn, 2000). Esto se acopla muy bien con la tendencia en ingeniería de procesos hacia los modelos de alta fidelidad, que permiten predecir trayectorias de variables clave que afectan el desempeño, seguridad y potencial económico del proceso. Adicionalmente, es importante incorporar algunas ideas de operabilidad de dichos procesos en etapas preliminares de diseño, ya que pueden incorporar nuevas restricciones que dificultan su operación como: modificación de grados de libertad, propagación de perturbaciones, nuevas de las regiones de factibilidad, operación dinámica, entre otros. De ésta manera, los esfuerzos experimentales podrían ser enfocados en la verificación de los procesos más que en la identificación de los posibles candidatos.

### 3. Operabilidad de sistemas bioreactores con membranas

Convencionalmente, los procesos industriales involucran unidades interconectadas. Por ejemplo, unidades secuenciales o sistemas con recirculaciones. El diseño y operación de sistemas integrados es un reto debido a la interacción que existe entre unidades. Aquí hay oportunidades de desarrollo debido a que a través de entendimiento de procesos, se pueden proponer maneras de mitigar o explotar esas interacciones y de esa manera podremos llegar a diseños de plantas y estrategias de operación más apropiados. Entonces, hay una gran necesidad que proporcionar entendimiento de sistemas a través de modelos que permita proponer metodologías para diseñar plantas con mejores condiciones de controlabilidad. Esto se ve soportado por desarrollos recientes en métodos numéricos y sistemas computacionales permiten manejar modelos matemáticos cada vez más complejos. Usando entonces aproximaciones basadas en modelos, el conocimiento actual en sistemas integrados puede usarse para entender escenarios donde la intuición no es suficiente para predecir el comportamiento del mismo.

#### 3.1 Bio-producción de ácido láctico – tecnología de bioreactores con membranas

Para complementar las ideas en el área de diseño, las implicaciones operacionales de tener un proceso intensificado con membranas para la producción de ácido láctico fueron investigadas (Prado-Rubio, Jørgensen y Jonsson, 2011; Prado-Rubio, 2010). El ácido láctico es un compuesto orgánico de gran importancia en las industrias: química, farmacéutica, cosmética y de alimentos. Sin embargo, recientemente ha cobrado mayor importancia debido a que es el precursor para la producción del ácido poli-láctico (PLA). Este polímero biodegradable tiene grandes aplicaciones en la industria textil, biomedicina y se perfila como un sustituto del poli-etileno. Para que la producción del PLA sea económicamente viable, y pueda sustituir sus competidores obtenidos del petróleo, se requiere la optimización de toda su cadena productiva incluyendo la producción del ácido láctico a partir de fuentes renovables.

La bio-producción de ácido láctico enfrenta dos retos principalmente: las bacterias ácido-lácticas sufren de inhibición por producto y la separación del ácido láctico representa casi un 80% de los costos de producción. Por tal motivos, los esfuerzos investigativos se han enfocado en los procesos de separación como precipitación, extracción con solvente, adsorción, destilación directa y más recientemente operaciones de separación con membranas (Prado-Rubio, 2010). Estas últimas son interesantes debido su alta selectividad, operación aséptica y prácticamente no hay generación de subproductos. Se propone entonces un diseño de equipo novedoso en la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) acoplando un fermentador con una unidad de membranas de intercambio iónico (REED) que permite simultáneamente: la remoción de producto *in situ*, operación a mayores densidades celulares, operación sostenible en continuo e incluso acoplar un control de pH (ver Figura 1). A pesar de prometedor, el diseño original impone retos como: naturaleza dinámica del sistema de fermentación en *batch* o *fedbatch*, la separación del lactato implica modificación del pH del caldo de cultivo y el sistema de membranas opera en forma periódica. Debido a la complejidad del sistema y falta de entendimiento del mismo, el diseño y operación del bio-reactor con membranas no es trivial. Surge entonces la necesidad de investigarlo a través de una aproximación basada en modelos, soportada por datos experimentales, que fue usada para explicar las limitaciones operacionales del sistema y proponer estrategias para su control.

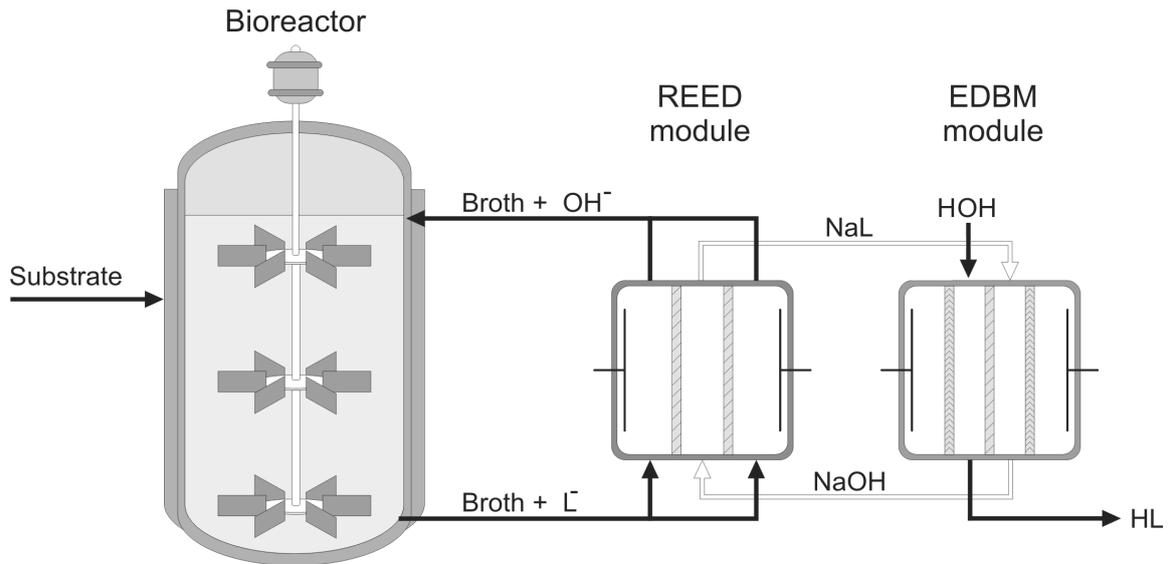


Figura 1. Diagrama de flujo para producción intensificada de ácido láctico – REED technology.  
Fuente. Prado-Rubio (2010).

### 3.2 Aproximación basada en modelos

Con el fin de investigar el diseño y operación el sistema propuesto utilizando modelos, estos deben cumplir con algunos requisitos:

- Tener poder predictivo: debido que se desea usar el modelo para predecir los mecanismos de transporte en el sistema
- Permitir la estimación de parámetros/funciones: debido a la complejidad del sistema, se desea poder compensar imprecisión estructural del modelo usando funciones mecánicas
- Evitar sobre-parametrización: factor clave para garantizar la identificabilidad de los parámetros
- **Útil para investigar tanto el diseño como la operación del sistema:** debe ser un modelo dinámico.

Teniendo en cuenta los requisitos anteriores, el proceso de modelamiento se ve reflejado en la necesidad de plantear una representación basada en principios físicos dinámicos, con una implementación flexible (i.e. simulación, estimación de parámetros, optimización, implementación de estructuras de control). Usando el estado del arte en modelos de transporte de especies a través de membranas de intercambio iónico, utilizando el modelo de Nernst-Planck combinado con la ley de Faraday, condición de electro-neutralidad y exclusión de Donnan, se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de multiregión (i.e. sistemas de ecuaciones diferenciales parciales acopladas por sus condiciones de frontera). Debido a limitaciones numéricas para lidiar con las condiciones de frontera durante la solución de las ecuaciones, es necesario utilizar un método numérico especial. Se utilizó el método de líneas usando una expansión de Taylor de 6<sup>th</sup> orden con diferencias asimétricas, para discretizar el sistema de ecuaciones parciales (PDE's) y llevarlo a un sistema de ecuaciones diferenciales algebraicas (DAE's) (Prado-Rubio, 2010).

## 4. Resultados

Para la investigación del sistema se planteó una estrategia sistemática que incluía: verificación del modelo para las membranas, análisis estático, análisis dinámico, integración con el modelo del fermentador y evaluación de estructuras de control (Prado-Rubio, 2010). (Nota: debido a confidencialidad y derechos de autor, se omiten resultados numéricos).

#### 4.1 Simulación del proceso

Se realizan simulaciones tanto estáticas como dinámicas en esta etapa. Las observaciones más representativas son:

- Verificación del modelo: utilizando valores de la literatura, se calibró el modelo para reproducir flujos de varios ácidos carboxílicos a través de la membrana de intercambio iónico (Prado-Rubio, 2010). Los resultados confirmaron que el modelo tenía la capacidad de reproducir tanto los flujos obtenidos como los coeficientes de difusividad encontrados por otros autores. De esta manera, se confirma que el modelo basado en la aproximación de Nernst-Planck es apropiada para representar el sistema y realizar predicciones.
- Análisis estático: se utiliza el modelo para predecir la influencia de campos eléctricos sobre el sistema. Esta condición de operación no tenía antecedentes teóricos. Se confirma la hipótesis acerca de que campos eléctricos mejoran el desempeño del sistema de membranas, la ventana de operación del equipo es identificada y estudios de sensibilidad mostraron los beneficios de operar a bajas concentraciones de hidróxido de sodio.
- Análisis dinámico: a través de simulaciones dinámicas, bajo condiciones de inversión de corriente, se predijo una pérdida de eficiencia de la corriente durante operación dinámica que se había evidenciado experimentalmente previamente. Adicionalmente, se encontró que la selección de la frecuencia de inversión de corriente resulta de un balance entre la eficiencia de la corriente y el consumo energético.

El entendimiento del proceso generado por los esfuerzos de modelamiento y simulación son vitales al momento de delimitar la ventana operativa del sistema, identificar restricciones (operativas y numéricas), determinar sensibilidad paramétrica y a entradas, entre otras. Cabe resaltar la importancia de la primera ley de control: “Nunca se va a poder controlar un sistema que no se entiende”, de allí la importancia de generar entendimiento de procesos a través de modelos, especialmente crucial para sistemas novedosos.

#### 4.2 Operabilidad del sistema de membranas y diseño de estructuras de control

Esfuerzos preliminares de simulación del sistema de membranas integrado con el bio-reactor mostraron que el sistema tenía una pérdida de grados de libertad y propagación de perturbaciones, esto se refleja en que el sistema es inestable. Esta condición es común en sistemas intensificados y de allí una de las limitaciones desatendidas por la comunidad científica, que se podría llamar: “consecuencias operacionales de la intensificación de procesos”. Para este caso entonces, se hizo necesario diseñar una estructura de control que estabilizara la operación del sistema integrado.

Teniendo en cuenta que el sistema intercambia selectivamente el ion lactato por uno hidroxilo usando membranas de intercambio aniónico, se puede explotar esta característica para plantear el objetivo de control del sistema. La operación del sistema de membranas acoplado con la fermentación puede facilitar el control del pH del cultivo. Por tanto, se expandió la metodología conocida como “Relative Gain Array” para diseñar la estructura de control (Skogestad y Postlethwaite, 2005).

La expansión propuesta permite manejar el diseño de la estructura de control para sistemas periódicos (dinámicos). En este sistema en particular, el pH presenta alta sensibilidad a la densidad de corriente aplicada pero hay limitaciones operacionales en cuanto a los niveles de corriente pueden aplicarse al sistema. Para poder explotar estas características, se propone una estructura de control no convencional conocida como “input resetting control structure” (Figura 2), donde el pH es controlado usando la densidad de corriente y su saturación se evita utilizando concentraciones variables de hidróxido de sodio a la entrada del sistema. Utilizando una aproximación novedosa basada en modelos, se mostró en simulación que la estructura de control fue exitosa para controlar el pH y mantener la densidad de corriente lejos de condiciones de saturación.

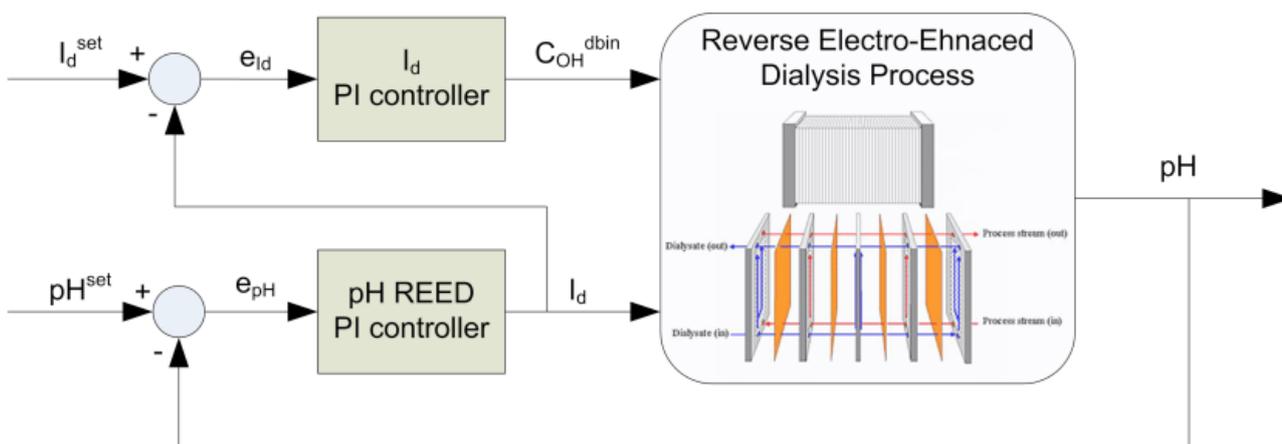


Figura 12. Estructura de control para controlar el pH de salida usando 2 variables manipuladas: Intensidad de corriente y concentración de hidróxido de sodio alimentado.

Fuente. Skogestad y Postlethwaite (2005).

### 4.3 Integración de las membranas con el bio-reactor

Usando la estructura de control diseñada, la integración del sistema de membranas y el bio-reactor se facilitó usando una estrategia de diseño secuencial debido a la atenuación de la propagación de perturbaciones. En la ventana operativa investigada, el sistema integrado controlado mostró estabilidad. Usando simulaciones, se compararon los desempeños de: una fermentación ácido-láctica discontinua (B), fermentación discontinua acoplada con electrodiálisis (B+ED), fermentación discontinua y la unidad de membranas propuesta en el trabajo (B+REED); con el fin de producir biomasa. Los resultados son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Comparación del desempeño de fermentaciones ácido-lácticas

Performance index	Batch bioreactor (B)	Batch B + ED	Batch B + REED	R E E D * improvement	Units
Batch time	10	11	7.8	- 29%	h
Final lactate	68.09	13.32	25.09	88 %	g/l
Final biomass	5.65	6.55	10.17	55%	g/l
Final substrate	≈ 0	≈ 0	4.77	-	g/l
Biomass yield	0.0706	0.0819	0.1352	65%	g/g
B i o m a s s productivity	0.565	0.596	1.304	118%	g/l/h

Fuente: Prado-Rubio (2010).

Tomando como línea base una fermentación convencional, el sistema propuesto de un bio-reactor discontinuo con la tecnología REED mostró:

- Reducción del 29% del tiempo de fermentación.
- Reducción del 88% del lactato presente en el caldo de cultivo al final de la fermentación. Condición favorable debido a la reducción de la inhibición por producto.
- Incremento del 55% en la concentración de biomasa producida.
- Aumento del 65% en el rendimiento de biomasa a partir de sustrato.
- Incremento en la productividad de biomasa del 118%.

El desempeño del bio-reactor acoplado a la tecnología REED mostró mejoras substanciales comparándolo con una fermentación discontinua por si sola y una acoplada con un sistema de electrodiálisis.

Experimentalmente se validó que no solamente la concentración final de biomasa se puede mejorar sino su viabilidad y actividad enzimática.

## 5. Conclusiones

La intensificación de procesos se ha popularizado en los últimos años debido a las grandes mejoras obtenidas en índices de desempeño de procesos debido a diseños novedosos. Sin embargo, el diseño de procesos intensificados impone retos para su operación que han sido desatendidos. Como consecuencia, los procesos intensificados tienen dificultades para su implementación e integración con otros procesos. Para estos casos, una estrategia secuencial de diseño equipos seguido de una estrategia de control no garantiza estabilidad del sistema. En esta contribución se muestra un ejemplo donde el diseño de procesos desacoplado de la estructura de control ofrece limitaciones operacionales. La operabilidad del sistema híbrido se ve favorecida al considerar limitaciones de control durante el diseño del proceso. Para hacer esto posible, el trabajo experimental debe ser complementado con el uso modelos genéricos para entendimiento de procesos, diseño de equipos, diseño de arquitecturas de control y evaluación del desempeño de los mismos.

A pesar del caso exitoso del bio-reactor con membranas, se deben complementar los esfuerzos que se hacen para el desarrollo de metodologías que permitan diseñar sistemáticamente procesos intensificados. Adicionalmente, hay que invertir mayor energía para investigar la operabilidad de sistemas intensificados en una etapa temprana del diseño, con el fin de evitar problemas de controlabilidad (diseño y control simultáneo de procesos). Finalmente, para trascender las ideas aquí mostradas, hay que pensar en estrategias que permitan diseñar procesos inexistentes y como se validarían (cambio en paradigmas de diseño).

### Bibliografía

- Gerven, T. & Stankiewicz, A. (2009). Structure, Energy, Synergy, Time - The Fundamentals of process Intensification. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 48, 2465–2474.
- Lutze, P. (2011). *An Innovative Synthesis Methodology for Process Intensification*. (PhD. Thesis). Technical University of Denmark.
- Prado-Rubio, O. (2010). *Integration of Bioreactor and Membrane Separation Processes: A model based approach* (Reverse Electro-Enhanced Dialysis process for lactic acid fermentation). (Ph.D. Thesis). Technical University of Denmark.
- Prado-Rubio, O., Jørgensen, S. & Jonsson, G. (2011). Systematic Procedure for Integrated Process Operation: Reverse Electro-Enhanced Dialysis during Lactic Acid Fermentation. *Computer-Aided Chemical Engineering*, 29, 1406-1410.
- \_\_\_\_\_. (2012). pH control structure design for a periodically operated membrane separation process. *Computers and Chemical Engineering*, 43, 120-129.
- Skogestad, S. & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design* (2nd Edition). Wiley.
- Stankiewicz, A & Moulijn, J. (2000). Process Intensification: Transforming Chemical Engineering. *Chemical Engineering Progress*.
- Suk, D. & Matsuura, T. (2006). Membrane Based hybrid processes. A review. *Sep. Sci. Technol.*, 41, 595–626.
- Takhtravanchi, M., Kaghazchi, T. & Kargari, A. (2009). Application of membrane separation processes in petrochemical industry: a review. *Desalination*, 235, 199–244.

## CONCLUSIONES

Con la meta establecida por el gobierno nacional de Colombia la más Educada en 2025, se ha mencionado la necesidad de encontrar eficiencia, eficacia y funcionalidad en nuestro sistema educativo, es por ello, que la apertura en cuanto a la implementación de espacios de aprendizaje alternativo y complementario con el uso de las TICs, nos permiten interactuar con personas relacionadas con el campo de la investigación y la generación de iniciativas de solución a los diversos problemas que se afrontan y que pueden ser abordados desde la ingeniería, convirtiéndose en alternativas para valorar la pertinencia de la formación que se está generando desde el Programa de Ingeniería de Procesos de la Universidad Mariana.

Responder a las necesidades y expectativas de las regiones y del país en torno a la búsqueda de su desarrollo, requiere la generación de espacios permanentes de aprendizaje, valorando las experiencias y los avances de las disciplinas en diferentes contextos, por eso se puede concluir que los eventos de tipo virtual con la participación de profesionales de reconocimiento nacional e internacional a nivel de investigación aplicada, permiten identificar y ratificar la pertinencia de nuestros programas académicos.

Las diferentes temáticas abordadas por los conferencistas invitados al II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos, generadas como resultado de investigaciones en el campo de los Procesos o experiencias exitosas en la aplicación de las áreas de formación en ingeniería, relacionados con los campos de procesos fisicoquímicos, biotecnológicos, en alimentos, agroindustriales o áreas afines, donde se requiera de operaciones o procesos unitarios y de procesos administrativos o de gestión, permiten afirmar que el camino que se está recorriendo en nuestro programa, obedece a las tendencias y necesidades nacionales e internacionales actuales.

Las ponencias presentadas por los invitados al II Simposio Virtual de Investigación Aplicada a la Ingeniería de Procesos, corresponde a resultado de investigaciones en las diferentes áreas de fundamentación del programa o experiencias exitosas en la aplicación de las áreas de desempeño propuestas por el mismo en la consecución de su registro calificado.

El desarrollo en las tecnologías de la comunicación y su facilidad en el acceso, se convierten en un excelente aliado para lograr la interacción con el sector externo representado en instituciones de educación superior de nivel nacional e internacional, facilitando la comunicación en tiempo real y sin limitaciones, pero además, contribuyendo a la construcción de comunidades académicas en donde se comparte los avances obtenidos como uno de los objetivos de la investigación, el cual corresponde a la apropiación social.

Se destaca una vez más la importancia de conocer las experiencias de diferentes profesionales que han incursionado en el campo de la investigación experimental en ingeniería y que en el momento se encuentran desarrollando sus estudios pos-graduales o aportando a la formación de nuevos profesionales especializados en este campo, con el fin de generar la motivación y el gusto por la investigación de las nuevas generaciones, pues una actividad académica en la universidad sin el componente de investigación, puede resultar inconsistente.

El desarrollo del evento ha permitido cumplir con los objetivos propuestos logrando la divulgación de experiencias investigativas exitosas en la aplicación de las áreas de formación en ingeniería y afines como estrategia de aprendizaje y perfeccionamiento de la formación específica, pero además, se ha logrado identificar tendencias de investigación en las diferentes áreas de fundamentación de la Ingeniería de Procesos, con lo cual se pretende un mejoramiento del que hacer docente e investigativo.

Por último y no por ello de menor importancia, se afianza en este espacio de aprendizaje generado a través del simposio virtual de investigación, con la socialización de experiencias de esta índole en diferentes campos de la ingeniería, el hecho de evidenciar en el programa de Ingeniería de Procesos, una opción transversal que nos lleva a identificar en los profesionales de esta área de conocimiento gran pertinencia y posibilidad de influencia para el desarrollo de la región y el país.





Editorial  
**UNIMAR**

Colección Evento



Universidad Mariana  
Calle 18 No. 34-104 San Juan de Pasto  
<http://www.umariana.edu.co/EditorialUnimar/>