

Solución ambiental de efluentes de una empresa azucarera con ingenio, destilería y bioeléctrica

Georgina Michelena-Alvarez*, Dania Alonso-Estrada, Orly López-Delgado

Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA).

Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* georgina.michelena@icidca.azcuba.cu

RESUMEN

En el trabajo se presenta dos propuestas de soluciones ambientales de efluentes de una empresa azucarera con ingenio, destilería y bioeléctrica. El sistema de tratamiento está basado en la combinación de lagunas, producción de biogás y luego el efluente emplearlo para el fertirriego. Se consideraron las corrientes de cada planta con descripción de la información y los tratamientos que se sugieren y el cumplimiento de las regulaciones ambientales establecidas en el país.

Palabras clave: tratamiento de residuales, solución ambiental, empresa azucarera.

ABSTRACT

The work shows two proposals for environmental solutions of effluents from a sugar mill factory, distillery and bioelectric plant. The treatment system is based on the combination of gaps, biogas production and then use the effluent for fertigation.

The currents of each plant were considered with a description of the information and suggested treatments and compliance with environmental regulations established in the country.

Key words: biocatalysts in obtaining bioethanol, immobilization, magnetic nanoparticles.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la industria azucarera y sus derivados a partir de la caña de azúcar, es una de las fuentes de más impacto en la contaminación debido a la generación de altos volúmenes de residuales líquidos de alto poder contaminante. Esto ha conllevado a que surjan restricciones cada vez más severas con relación al vertimiento de los efluentes industriales, por lo que deben ser tratados adecuadamente a fin de reducir la contaminación ambiental.

El sector industrial azucarero cubano requiere de realizar acciones que minimicen el impacto ambiental mediante la aplicación de tratamiento a los residuales. Debido a esto, se ha elaborado la solución tecnológica para definir el sistema de tratamiento de los efluentes de una empresa azucarera que además cuenta con una destilería y la próxima instalación de una bioeléctrica.

Se pueden enumerar varios métodos de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, que dependiendo de su eficiencia tendrán mayor o menor costo de inversión y operación. Teniendo en cuenta que el país debe dedicar el mayor número de recursos a su propio desarrollo industrial, se ha seleccionado un método que logre un compromiso o balance adecuado entre los factores mencionados y se considera una propuesta alternativa.

El uso de sistemas de tratamiento basado en la combinación de lagunas, producción de biogás y luego emplear el efluente para el fertirriego es una medida conveniente, teniendo en cuenta que son estructuras de fácil operación y mantenimiento, que logra disponer el residual de forma económica, eficiente y el clima del país es favorable para este fin.

El objetivo de este trabajo es suministrar la información acerca del sistema de tratamiento de los residuales de una empresa azucarera con producción de derivados cumpliendo con las regulaciones ambientales establecidas en el país.

BASES CONCEPTUALES DEL PROYECTO DE SOLUCIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUALES

La concepción general de la solución integral de los residuales del complejo agroindustrial responde a conceptos del diseño que garantizan disminuir del impacto ambiental y la consecuente producción y consumo sostenible.

Para cumplir este objetivo, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Segregación de los efluentes líquidos generados en el proceso según sus características.
2. Empleo de sistemas de enfriamiento con agua tratada y circuitos cerrados para el uso eficiente

del agua: Ej. En la planta moledora, las aguas de enfriamiento de los molinos, turbogeneradores, bombas de vacío, compresores; en la destilería, condensadores y control de la temperatura de los fermentadores.

3. Recuperación al máximo de los condensados que permita su utilización como agua de alimentación a las calderas y uso tecnológico.
4. Disminución al mínimo indispensable de las aguas empleadas en la limpieza de los equipos del proceso y recuperar como agua dulce los enjuagues.
5. La cachaza en todos los casos deberá ser extraída en seco y nunca ser diluida.
6. Las fugas de jugos azucarados deben ser reducidas al mínimo.
7. Mantener una estricta vigilancia en los parámetros de operación.
8. Garantizar niveles suficientemente altos para evitar inundaciones, el drenaje pluvial será por medio de un sistema de canales.
9. Las instalaciones del sistema de recolección de residuales interiores tendrán las zanjas y canales tapados, diseñados con pendiente óptima.
10. La necesaria higiene y asepsia del proceso de molienda se logra, con agua caliente a presión y vapor de escape sin la aplicación de productos químicos.
11. El bagazo, al salir de la planta moledora es conducido por transportadores de arrastre a través de galerías cubiertas para su combustión.
12. Tanto la ceniza de las calderas como la cachaza coproductos del proceso productivo se almacenan en tolvas y se trasladan a la planta de compost para utilizarlos como fertilizantes, lo que ayuda a restituir los nutrientes a los campos de cultivo.
13. Existencia de un sistema de protección contra incendios.
14. Instalación de un sistema de malla de tierras y pararrayos.
15. Aislamiento térmico de todos los equipos y tuberías que lo requieran, de acuerdo a las temperaturas que manejan los distintos fluidos del proceso, tanto por ahorro de energía, como por protección a los trabajadores.
16. Se garantizará el sistema adecuado de colores de equipos y tuberías y el de señales con el fin de evitar accidentes.
17. Los residuos sólidos generados en todo el complejo como basura, recipientes, cubiertas, embalajes de materias primas y residuales de oficinas (papeles y cartón), serán recogidos, clasificados y se dispondrán fuera de la planta. Se conveniará con la empresa recicladora de materias primas los residuales sólidos con valor comercial.

La empresa azucarera + derivados genera múltiples efluentes líquidos, gaseosos y co-productos sólidos los cuales serán tratados o dispuestos de forma diferenciada.

DESCRIPCIÓN TECNOLÓGICA Y CARACTERÍSTICAS DE LOS RESIDUALES INDUSTRIALES

En el complejo industrial se generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos. En este trabajo, los residuos han sido analizados teniendo en cuenta los conceptos de Producción Más Limpia (uso, reúso, reciclaje y tratamiento). Se consideraron la segregación de todos los flujos que deben tener un tratamiento diferenciado y la unión de aquellas corrientes con características contaminantes que posibiliten un único tratamiento.

La empresa está dividida en la planta procesadora de caña y en la destilería, y a los efectos de este trabajo se considera la bioeléctrica.

Unidad: Planta Procesadora de Caña

Área Recepción y Preparación de Caña.

Área Planta Moledora.

Área Purificación

Área Concentración del jugo.

Área Planta producción de Miel Invertida (HTM).

Unidad: Destilería

Área Fermentación.

Área Destilación.

Área Deshidratación.

Unidad: Bioeléctrica.

Área energética.

Área de Recepción, Manipulación y Almacenamiento de Biomasa.

Servicios auxiliares

Sistema de suministro de agua, planta de tratamiento de agua y protección contra incendios.

Taller y bases de operaciones.

Laboratorios.

Cocina – Comedor – Cafetería.

Servicios sanitarios.

Emisiones

Los focos de contaminación de contaminantes atmosféricos son el transporte interno y externo de la empresa. La combustión incompleta desde el transporte de la caña de azúcar y otros insumos desde las fuentes móviles relacionadas con la transportación desde y hacia las instalaciones del ingenio. Los contaminantes son los relacionados con emisiones de combustiones incompletas producidas por el transporte dentro y fuera de la empresa. Los más

importantes son los óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_2 + \text{NO}$), el polvo PM-5 y PM-10 y el bagacillo procedentes de los procesos de producción fundamentalmente en la casa de bagazo y de calderas.

La generación de energía eléctrica genera expulsión de dióxido de carbono y partículas de hollín. Los vertidos de grasas y aceites se generan en el proceso industrial y pasan por las trampas de grasas.

Residuales líquidos

Se generan corrientes residuales debido a los procesos productivos que se descargan a zanjas que se unen en un punto y de ahí pasan al sistema de tratamiento que consta de dos lagunas de oxidación.

El sistema de tratamiento de residuales actual está compuesto por las siguientes áreas:

1. Sistema de zanjas.
2. Trampas de grasa.
3. Separador de sólidos.
4. Conductoras de residuales.
5. Lagunas de tratamiento de residuales.
6. Vaso de riego.
7. Sistema de riego.

Los residuales líquidos de la fábrica son evacuados mediante un sistema de canales llamados zanjas y conductoras subterráneas, el cual se diseña de acuerdo a las características y disposición de los equipos en dicha fábrica. Actualmente no se separan las aguas de desecho fabriles de los albañales. Este sistema finaliza en las trampas de grasa, las cuales tienen la función de separar las grasas del resto de la corriente de residual. Del sistema de lagunas pasa a una laguna de más capacidad llamada vaso de riego para ser utilizada en el fertiriego.

Vertidos: las trampas de grasas y sólidos no funcionan correctamente por lo que el agua residual integral llega a las lagunas de oxidación con una alta concentración de sólidos y grasas en forma de bagacillo, de cachaza y grasas del equipamiento industrial. Posteriormente los residuales pasan por la conductora hacia los separadores de sólidos, los cuales tienen la función de separar bagazo y otros tipos de sólidos de la corriente residual. Actualmente, este residual se une en un punto con las vinazas de la UEB Derivados, pasan a través de un sedimentador y de ahí éste pasa al sistema de tratamiento compuesto por tres lagunas revestida con geomembranas y posteriormente pasa al vaso de riego para ser utilizado en el fertiriego.

Debido al incremento previsto en la capacidad del ingenio, la destilería y la bioeléctrica, esta propuesta plantea segregar los residuales del ingenio al de la destilería. Utilizar el actual sistema de lagunas para el ingenio y construir un nuevo sistema de lagunas para la destilería.

Residual líquido: las características físico-químico del residual integral del ingenio y de las lagunas de oxidación desde el punto de contaminación ambiental se muestran en la tabla 1. Esta caracterización coincide en sus valores promedios con los reportados en [1].

Tabla 1. Caracterización de la salida integral (de los residuales del ingenio y la destilería y la segunda laguna de oxidación de la empresa azucarera desde el punto de vista de contaminación ambiental

Ensayo (Unidad)	Laguna 1	Laguna 2	
DQO (mg.L^{-1})	Prom	15485	6474
	DE	8071	3354
	CV	52	52
DBO (mg.L^{-1})	Prom	5043	3797
	DE	2690	1804
	CV	53	48
pH	Prom	4,49	4,54
	DE	0,02	0,11
	CV	0,45	2,42
CE (mS.cm^{-1})	Prom	5,56	5,05
	DE	1,47	0,51
	CV	26	10
Nt (mg.L^{-1})	Prom	20	29
	DE	18	11
	CV	92	39
Pt (mg.L^{-1})	Prom	61	45
	DE	44	25
	CV	72	56

CE: conductividad eléctrica. Se colocan el promedio, desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV) de tres muestras puntuales..

Se puede observar que el residual integral o entrada de la primera laguna posee una DQO elevada del orden de los 15485 mg.L^{-1} , tomando en cuenta que la DQO promedio de un ingenio con una política adecuada de uso y reuso del agua es de aproximadamente de $2000\text{-}5000 \text{ mg.L}^{-1}$, por lo que se evidencia que contiene altos contenidos de materia orgánica como azúcares no recuperados, cachaza, bagacillo y grasas y aceites del residual azucarero y los contaminantes orgánicos de las vinazas de la destilería. La relación de DBO/DQO en promedio de las muestras analizadas fue de 0,33, indicando que aproximadamente el 33 % de la materia orgánica

es biodegradable, posiblemente por la presencia de azúcares no recuperados durante el proceso industrial y el resto en mayor proporción debe estar compuesto fundamentalmente por material sólido poco biodegradable como cachaza y bagacillo y otros compuestos recalcitrantes de las vinazas de la destilería. Las concentraciones de nitrógeno y fósforo de las muestras analizadas son bajas características propias del tipo de residual.

El pH de las muestras analizadas fueron ligeramente ácidos debido a la descomposición de la materia orgánica que produce ácidos grasos volátiles. La conductividad eléctrica de las muestras analizadas son elevadas debido posiblemente a la presencia de altos contenidos de iones inorgánicos como potasio y sulfatos provenientes de las vinazas de la destilería.

El % de remoción de la materia orgánica del sistema de tratamiento basado en las dos lagunas de oxidación en base a la DQO es solo el 58 %, y en base a la DBO es del 25 %, lo que indica que no se degradan apropiadamente toda la materia orgánica biodegradable por un mal funcionamiento de las lagunas.

La entidad cuenta con un sistema de tratamiento donde todos los residuales que salen de la industria se unen a los de la destilería a través de tuberías que se encuentran en buen estado y estos son controlados por registros durante todo su recorrido hasta el sistema de lagunas de oxidación, que están impermeabilizadas.

Residuos sólidos

Se generan vertidos accidentales de cachaza y de bagazo en el proceso que pasan al residual líquido que no son retenidos adecuadamente en las trampas de sólidos, por lo que el residual llega a las lagunas de oxidación con un contenido de estos materiales. La cachaza obtenida en el proceso industrial recibe un tratamiento que permite obtener compost que se utiliza como biofertilizante de la propia caña de azúcar o se vende a productores agrícolas de la localidad.

La situación actual que presentan los residuales es:

- Alto volumen de residuales.
- No se desagregan.
- Alto volumen de sólidos (bagazo, cachaza y arena proveniente de la cal).
- El traslado de residuales es a través de zanjas.
- Las lagunas contienen alto nivel de sólidos.

La arena que se vierte al sistema de residuales proviene de la calera y de la planta de agua. En la calera existe un desarenador, no así en la planta de agua. El bagazo que se incorpora en los residuales proviene fundamentalmente de la planta moledora y la cachaza de las extracciones que se hacen a los clarificadores y derrames del cachazón y filtros.

RESIDUALES GENERADOS

Ingenio azucarero

Suministro de caña, molinos y extracción

Las aguas residuales de estas áreas arrastran residuos procedentes de la molida o sea extracción del jugo de la caña, y posibles residuales de la lubricación del equipamiento procedente de las chumaceras de los molinos. Son aguas contaminadas con contenido de fuel oil, grasas lubricantes y pequeñas cantidades de sacarosa que escurren y se convierten en aguas residuales.

Estas aguas son dispuestas a una zanja tapada con rejillas metálicas y se conduce al sistema de tratamiento a través de una trampa de grasas y sólidos. Posteriormente, las aguas residuales se incorporan al sistema de zanjas hasta el receptor de la laguna de oxidación y posteriormente al vaso para el sistema de fertirriego.

La trampa realiza la separación bajo el principio de la diferencia de pesos específicos entre el agua, sólidos en suspensión y las grasas, quedando las mismas en la superficie lo cual facilita su extracción por medio manual a través de un orificio que posee la misma en la parte superior. La trampa se construye con bloques de concreto, la parte superior quedará 0,15 m sobre el nivel del piso para evitar que el agua superficial entre a ella, y posee dos cámaras, la cámara receptora será 2/3 del volumen total de la trampa y se comunica con la que entrega por medio de una sifa que deja pasar sólo el líquido, quedando la grasa atrapada en la cámara receptora que es la que posee el orificio en la parte superior para extraer las grasas por medios mecánicos. Los sólidos sedimentables se depositarán en el fondo de estas trampas, las cuales deberán limpiarse con la frecuencia que demanden en cada caso. Los sólidos y las grasas recolectados en las trampas serán quemados en las calderas.

La tubería de salida de la trampa continúa con el efluente por el sistema de zanjas y que se unirá con el caudal del residual líquido de la bioeléctrica para luego ser conducido a la laguna. En este punto se instalará un medidor de flujo y un muestreador.

Clarificación del guarapo

Las aguas residuales que se originan son procedentes de la limpieza de los tanques de alcalización, jugo mezclado y las procedentes de los clarificadores. Contienen jugos azucarados, tierra y cachaza, por lo que son sumamente agresivas y deben ser dispuestas al sistema de tratamiento.

Filtros rotatorios

En esta área se produce un residual sólido o cachaza de alto poder contaminante, que será dispuesto en tolvas para su disposición en el suelo

como mejoramiento del mismo o mediante su uso como compost. El Central dispone de una cachacera para recepcionar el sobrante de cachaza y de otras materias separadas en esta operación. Debe evitarse que la cachaza que cae al suelo al vaciar la cachacera sea vertida en la zanja y mezclada con el residual líquido, lo cual incrementa el contenido de sólidos en el residual y la disminución de la eficiencia de la laguna. A la cachaza vertida en el suelo se le adicionará bagazo y se retirará como residuo sólido para el área de compost.

Área de evaporación

En la evaporación se elimina agua en forma de vapor y posteriormente esta se condensa, dichos condensados en ocasiones llevan consigo arrastres de azúcar, lo que representa una contaminación, por la demanda bioquímica de oxígeno. También se desechan aguas residuales producto del lavado de los evaporadores y calentadores, en los cuales se utilizan ácido clorhídrico y sosa cáustica para su limpieza.

La sosa cáustica producto de la limpieza una vez agotada debe ser enviada junto con sus enjuagues al enfriadero para aumentar el pH del mismo.

La corriente ácida tiene que ser almacenada en un tanque colector del cual se dosifica al sistema de tratamiento para controlar un valor de pH adecuado.

Proceso de cristalización

En esta división compuesta de tachos y cristalizadores fundamentalmente, se obtienen las aguas de los condensados del vapor que se generan al evaporar el jarabe en los tachos. Generalmente tiene un bajo contenido de DBO y representa un volumen elevado.

Área de centrifugas

Las aguas residuales procedentes de la limpieza de la centrifuga son reutilizadas dentro del proceso por su contenido de azúcares.

Área de envase de azúcar y azúcar a granel

En esta área no deben producirse residuales líquidos, y los derrames de azúcar producidos de forma esporádica deben ser colectados con palas, por lo que no se considera un residual. El residual líquido que se produce por la limpieza del área será conducido al sistema de tratamiento.

Divisiones que ayudan a la producción

- Enfriadero. Se produce una corriente residual producto de la extracción del fondo que se produce excepcionalmente durante la zafra, que se enviará al sistema de tratamiento en forma dosificada, no liquidando el enfriadero de una sola vez.
- Planta de generación de vapor y planta de tratamiento de agua. Las aguas residuales procedentes de las extracciones de calderas y de las plantas de tratamiento de aguas industriales, por el contenido

de cargas orgánicas se recomienda su disposición hacia la red de drenaje de dilución.

- Área de preparación de la lechada de cal. Produce una corriente residual con alto contenido de cal, esta corriente se dirige a las zanjas que la conduce al sistema de tratamiento. Existe un desarenador en esta área para tratar la cal que va al proceso, operación que debe mejorarse mediante el uso de hidrociclones.
- Condensados sobrantes. Los condensados del proceso, son recolectados y dispuestos para su máxima reutilización en el proceso de fabricación, tales como: agua de reposición en las calderas, agua de imbibición, para diluir las mieles, la limpieza y el lavado de centrifugas, filtros evaporadores, calentadores. A pesar de estos usos existen sobrantes, que se recomienda disponerlos como agua de reposición al enfriadero para los condensadores.

Otras divisiones que vierten al alcantarillado

- Comedor. Produce corrientes que contienen grasas, detergentes, son conducidas a través de una trampa de grasa por el sistema de zanjas y canales al sistema de tratamiento.
- Servicios sanitarios. Producen corrientes contaminadas y su vertimiento es al sistema albañal. Debe ser una corriente segregada a los efluentes industriales.
- Laboratorio. Produce una corriente residual de bajo poder contaminante que contiene residuos del fregado de la cristalería, miel, guarapo, producto del sistema del central y se vierte al sistema de tratamiento.

Destilería

La destilería tiene capacidad actual de producción de 500 HI/d de etanol pero se prevé su ampliación a 1000 HI/d en el 2030, con un régimen de producción de 296 días de operación promedio y con un porcentaje alcohólico promedio de 6 %. Se estimará un volumen de vinaza de 1600 HI/d y un volumen total de 1700 HI/d.

El esquema tecnológico de la destilería está previsto para trabajar con mieles y jugos de los filtros. Esta producción se efectúa mediante unidades de proceso básicas:

- Propagación industrial de la levadura.
- Fermentación alcohólica.
- Recuperación de levadura.
- Destilación.

Como abastos reciben mieles (y/o jugos) y sales nutrientes y como utilidades, suministro de agua, vapor y electricidad que hacen posible el funcionamiento de toda la instalación, incluidos el sistema de tratamiento de residuales y el almacenamiento de insumos y producción.

La batición va despojándose del alcohol en la columna de destilación hasta que sale por el fondo ya en forma de mostos (vinaza), residuo más significativo por su agresividad y volumen a manejar (tabla 2), para los intercambiadores, o la zanja que lo lleva a las lagunas de oxidación.

Otros efluentes líquidos

En una destilería, otras fuentes de corrientes líquidas la constituyen:

- Lavado de fermentadores.
- Aguas de limpieza en general.

Tabla 2. Caracterización de la vinaza de la destilería desde el punto de vista de contaminación ambiental

Ensayo (Unidad)	Vinaza
DQO (mg.L ⁻¹)	56049
DBO (mg.L ⁻¹)	23077
pH	4,19
CE (mS.cm ⁻¹)	13,39
Ca (mg.L ⁻¹)	169
K (mg.L ⁻¹)	3850
Na (mg.L ⁻¹)	210
Sólidos Totales (mg.L ⁻¹)	53235
Sólidos Totales Disueltos (mg.L ⁻¹)	50975
Sólidos Totales Suspendidos (mg.L ⁻¹)	2260
Sólidos Totales Fijos (mg.L ⁻¹)	20490
Sólidos Totales Volátiles (mg.L ⁻¹)	32745
Índice de Agua Residual (m ³ /hl)	1,4

De acuerdo al caudal y concentración de estas corrientes así será el nivel de dilución del mosto. Los mostos residuales, en condiciones cubanas, varían de 1,4 – 1,6 m³/hl de alcohol producido, mientras que las aguas de lavado de fermentadores se encuentran entre 2,5 a 5% de esta cantidad.

La tabla 3 muestra los índices promedios para la destilería. Se observa que las aguas procedentes de la limpieza de los fermentadores y tanques de crema presentan una DBO de 44 kg/m³ y al mezclarse con los mostos o residuales procedentes del área de destilación produce residuales líquidos combinados cuya DBO es aproximadamente 24 kg/m³, con índice de 1,6 m³/hl alcohol.

Tabla 3. Origen de las aguas residuales en la destilería

Clasificación	Volumen (m ³ /hl)	DBO (kg/m ³)	Carga Orgánica (kg DBO/hl)
Vinaza	1,6	23	32,2
Limpieza de fermentadores	0,1	44	4,4
Residuales Combinados	1,7	24	24,2

La vinaza constituye un residual líquido muy agresivo por el alto contenido de materia orgánica biodegradable generada en el área de destilación.

La vinaza se unirá al resto de los efluentes líquidos de la destilería y se mantendrá segregada de los residuales del ingenio para facilitar la depuración de las aguas.

Aceite fusel (fusel oil): Líquido que se genera en la columna rectificadora en el área de destilación. Dependiendo de la calidad del mosto fermentado la retirada de aceite fusel varía entre 1 a 2 litros por m³ de etanol producido. Está formado fundamentalmente de alcoholes superiores que se concentran en la columna destiladora por su baja miscibilidad en agua y alcohol. Su composición es la siguiente:

Etanol.....10 a 14 %
 Iso-amílico.....45 a 60 %
 n-propanol.....1 a 2 %
 Iso-butanol.....6 a 8 %

El aceite fusel se unirá con la vinaza para ser tratado junto a ella o se separará para darle mayor valor de uso.

Condensados: agua generada por la condensación del vapor en el sistema de destilación y deshidratación. Esta agua es recolectada en un tanque de almacenamiento de condensados y enviada a la planta de generación de vapor (calderas). La destilería mantiene su caldera independiente a pesar de la bioeléctrica.

Agua de limpieza de los pisos de la destilería (F=4,8 m³/d, DQO= 0,01 kg/ m³), se une al residual combinado de la destilería y se canaliza junto al sistema de tratamiento.

Resumen de efluentes destilería

No	Corriente residual	Flujo	Destino
1	Crema de Levadura <i>Saccharomyces</i>	8 t/d	Esta crema se vende a los productores de la zona como alimento animal después de pasar por un tratamiento de termólisis y lavado para matar la levadura y eliminar los restos de etanol de la corriente.
2	Flemaza (área de destilación)	20 L/d	Puede recircularse a la columna de destilación para el lavado de los fermentadores o como agua de imbibición en los molinos. Se mezcla con la vinaza y se conduce a la laguna de oxidación.
3	Vinaza	700 m ³ /d (actual) 1600 m ³ /d (2024)	La vinaza se unirá al resto de los residuales de la destilería y se enviará segregada a los residuales del ingenio.
4	Aceite fusel	1,4 m ³ /d	El aceite fusel se unirá con la vinaza para el tratamiento.
5	Agua generada por la condensación del vapor en el sistema de destilación y deshidratación	62,4 t/h	Esta agua será recolectada en un tanque de almacenamiento de condensados y enviada a la planta de generación de vapor.
6	Flemaza del lavado de los fermentadores: efluente resultante del lavado de los equipos en el área de fermentación	10 m ³ /d	Esta corriente se enviará hacia la conductora de drenaje industrial de la destilería y posteriormente a la Planta de Tratamiento de Residuales.
7	Agua de limpieza de los pisos de la destilería	5 m ³ /d	Esta corriente se enviará hacia la conductora de drenaje industrial de la destilería y posteriormente a la Planta de Tratamiento de Residuales.

Flujo total de efluentes de la destilería: 1616 m³/d ≈ 70 m³/h

Se ha determinado, que no hay respuestas sencillas para una solución técnica y económicamente adecuada en el tratamiento de la vinaza y puede repercutir en la viabilidad de la UEB debido a las regulaciones ambientales exigentes y el inicio de políticas de penalización con empresas incumplidoras de las regulaciones. Minimizar los volúmenes y la agresividad de este residual podría ser el primer paso. A continuación, algunas de las consideraciones a tener en cuenta:

1. Realizar las inversiones necesarias para lograr la recuperación de la levadura.
2. Lograr mayores rendimientos en la fermentación alcoholera evitando altas concentraciones de materia prima en los residuos líquidos. Esto puede cambiarse mediante la introducción de la fermentación semicontinua o mediante un control más eficiente del proceso discontinuo. Se debe tener en cuenta que la calidad del residual es el más fiel reflejo de la eficiencia del proceso.
3. Programar adecuadamente los períodos de limpieza.
4. Utilizar los fondajes de tanques de crema directamente para alimentación animal.
5. Utilizar el menor volumen de agua posible en la limpieza de equipos y locales.

6. Enfriamiento del mosto y recuperación de energía.

Así el sistema de tratamiento será menos costoso y el efluente final tendrá mayor calidad, lo cual repercute en la economía de la fábrica.

Bioeléctrica

La instalación de una Planta Bioeléctrica, cuya materia prima sea la biomasa procedente de la caña de azúcar y de la biomasa forestal tiene el objetivo de abastecer de energía eléctrica a la unidad azucarera y a la destilería, entregando el resto al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y operando fuera de la época de zafra con biomasa acumulada para una mayor entrega de energía al SEN. Para lo cual se proponen dos variantes:

1. Utilización de la biomasa cañera (Bagazo + RAC) propia del Ingenio.
2. Biomasa cañera propia del ingenio + biomasa cañera tributada de otros ingenios de la Provincia de Matanzas + biomasa forestal.

La planta Bioeléctrica es una unidad generadora de tipo convencional, que operará como una planta de cogeneración, a partir de la entrega por parte del

Tabla 4. Efluentes estimados de la bioeléctrica

No	Corriente residual	Flujo	Característica	Destino
1	Drenaje de residuales de torre de enfriamiento	Capacidad media en zafra: 6,1 m ³ /h Capacidad media fuera de zafra: 24,8 m ³ /h	Iones de sal ≤20000~40000mg/l DQO≤100mg/l SS<500 mg/L Descarga discontinua 2 veces al día	Canalizar hacia la piscina de químicos y analizar la posibilidad de incorporarlas a la formulación de alimento animal. Flujo: 10 – 30 m ³ /h
2	Drenaje de agua de planta de tratamiento de agua química	Capacidad media en zafra: 3,7 m ³ /h Capacidad media fuera de zafra: 7,4 m ³ /h	Iones de sal ≤20000mg/l DQO≤30mg/l SS<80 mg/L	
3	Agua concentrada de ósmosis inversa	Caudal máximo: 89 m ³ /h Caudal promedio en el período de zafra: 3,7 m ³ /h Caudal promedio en el período fuera de zafra: 7,4 m ³ /h	Iones de sal ≤20000mg/l DQO≤30mg/l SS<80 mg/L Descarga discontinua 2 veces al día	Canalizar hasta el punto de unión de los residuales del ingenio y conducir juntos hasta laguna de estabilización Flujo máx.: 300 m ³ /h
4	Drenaje de piscina de neutralización	Capacidad máxima: 40 m ³ /h Capacidad media: 0,33 m ³ /h	pH=6~9 Descarga discontinua una vez cada 5 días	
5	Aguas residuales servidas	Capacidad media: 0,1 m ³ /h	DBO= 50~200mg/l DQO=100~300mg/l SS=150~200mg/l	
6	Agua de limpieza química de la caldera	150 m ³ /vez	pF=9~10 SS<1000 mg/L Descarga discontinua 1 vez cada 3 años	
7	Purificador de agua retrolavado aguas residuales	Capacidad media en zafra: 3,3 m ³ /h Capacidad media fuera de zafra: 6,9m ³ /h	SS<5000~10000 mg/L	
8	Drenaje de desbordamiento de estanque de ceniza	Capacidad media en zafra: 6,03 m ³ /h Capacidad media fuera de zafra: 4,61 m ³ /h	PH=2~6 SS:500~3000mg/l	
9	Lixiviados de vertedero de patio de bagazo		DQO:5100~8000mg/l DBO:4500~6000mg/l SS:1700~1900mg/l pH=4.7~5.7	Es el agua pluvial que fluye del patio de almacenamiento, como se contamina debe unirse al residual del ingenio para su tratamiento.

Flujo total de efluentes de la bioeléctrica: 39 - 66 m³/h en dependencia si es época de zafra o no zafra, con aproximadamente 10 g/l de iones de sal, notar que los efluentes recurrentes de la bioeléctrica son descargas discontinuas 2 veces al día.

ingenio de todo el bagazo producido y del condensado puro procedente de los equipos de transferencia de calor del Central, mientras que ella suministrará a la fábrica de azúcar el vapor de baja presión necesario procedente de sus turbinas para el proceso de elaboración de azúcar y la electricidad necesaria para elaborar su producción.

Los efluentes de la Bioeléctrica se estiman como muestra la tabla 4.

El drenaje del área de la planta utiliza un sistema separado de agua de lluvia, aguas residuales servidas y aguas residuales de producción, dividido en sistema de drenaje de aguas pluviales, sistema de drenaje de aguas residuales servidas y sistema de drenaje de aguas residuales de producción en fábrica.

Las aguas residuales de producción se dividen en aguas residuales recurrentes y no recurrentes. Las aguas residuales recurrentes se refieren principalmente a la descarga continua o intermitente de aguas residuales durante la producción normal, incluido el drenaje de la caldera, el drenaje de agua de planta de tratamiento de agua química, el drenaje del sistema de agua de circulación y el drenaje de estación de purificación. Las aguas residuales no recurrentes se refieren principalmente a la descarga temporal de aguas residuales de la limpieza química de la caldera, la limpieza del equipo, almacén de combustibles y el lavado del piso de la planta.

Las aguas residuales servidas en el área de la bioeléctrica, se conducen hacia tratamiento en el tanque séptico y se unen al residual doméstico del ingenio.

CONCEPCIÓN GENERAL DE LA SOLUCIÓN INTEGRAL DE RESIDUALES

Soluciones ambientales a las corrientes sólidas

Producción de compost a partir de cachaza, cenizas, bagazo

La producción de abono orgánico (compost) es una alternativa de solución al uso de los residuales contribuyendo al saneamiento ambiental y al mejoramiento del suelo con el consiguiente efecto positivo sobre los rendimientos agrícolas.

La tecnología propuesta de producción de compost considera la utilización total de la cachaza, y las cenizas, y la utilización parcial de bagazo generados en el proceso. Los sólidos se segregan en el separador de sólidos cercano al área de molinos, en el separador de sólidos que procesa el residual líquido integral antes de su tránsito por los canales que conducen al tratamiento, en el sedimentador (desarenador) de la planta de cal y en la trampa de grasa. Estos materiales serán conducidos al área mediante camiones.

El composteo se realizará mediante el método

de canteros con la utilización de un inoculante biológico y totalmente mecanizada. Los resultados han sido positivos, lográndose compost que aportan al suelo:

Materia Orgánica: > 55%

Nitrógeno: 2,5 - 3,0 %

Fósforo: 2,5 - 2,8 %

Potasio: 1,5 - 1,8 %

Trazas de Calcio, Hierro, Molibdeno, entre otros

El terreno debe ser preparado de manera que no se inunde si llueve, dando la adecuada pendiente para permitir escurrir el exceso de agua.

El área a ser seleccionada debe cumplir los siguientes requisitos:

- Proximidad a la instalación para minimizar los costos de transportación.
- Localización tomando en cuenta la dirección predominante del viento a fin de que los malos olores típicos de las primeras semanas de degradación sean empujados por el viento hacia lugares despoblados.
- Acceso fácil para la entrega del producto terminado.

La aplicación del compost puede ser en las áreas cañeras o puede venderse a pequeña y medianas empresas para su uso en otros cultivos.

Soluciones ambientales a las corrientes líquidas

La red de aguas servidas recogerá los efluentes procedentes de las edificaciones socio administrativas y laboratorios. Estos residuales albañales se recogen mediante colectores que los conducen hasta un punto que entregará al tratamiento en fosa séptica.

Se realiza la separación de los efluentes industriales de los de aguas servidas ya que las características de ambos efluentes difieren, por tanto, las aguas residuales del proceso industrial serán enviadas a un sistema de tratamiento y las aguas servidas serán procesadas en otro sistema. Para la red de aguas servidas los colectores serán de sección transversal redonda, se usará tubería de PVC de diámetro 8" con juntas de goma, en tramos de 6,0 m.

Solución de los efluentes líquidos de aguas servidas

Las aguas albañales junto con los de la cocina, comedor y cafetería pasarán por una trampa de grasa, la corriente líquida tratada se envía al sistema de las corrientes segregadas de la industria y conducida por la zanja de agua servidas a fosa séptica. En el colector principal, se instalará un sistema completo de pretratamiento mecánico compuesto por: desarenador, trampas de grasas y medidor de flujo, lo contabilizará la cantidad de residual emanado, para poder evaluar su comportamiento. Se instalarán además medidores de flujo en las zanjas princi-

pales de los objetos de obras más generadores de residuales.

Solución de los efluentes líquidos con carga orgánica contaminante

En este trabajo se proponen dos sistemas de lagunas para el posterior uso en fertirriego, una con baja concentración de demanda química de oxígeno producto de la recolección de efluentes líquidos generados en las unidades ingenio y bioeléctrica y un segundo sistema de lagunas con alta carga orgánica, producto de los efluentes líquidos generados en la destilería.

Esta alternativa permite reponer al suelo parte de la materia orgánica e inorgánica extraída con la caña de azúcar. Además, esta solución tiene un fin económico, ya que, sustituye fertilizantes y agua necesarios para los cultivos. Para aplicar esta técnica, es imprescindible tener en cuenta las características del suelo y el cultivo para definir las normas de aplicación. Así como también las regulaciones medio ambientales vigentes.

El sistema se basa en la conducción por gravedad, de las aguas residuales industriales a través de colectores diseñados para esos fines.

El sistema de residuales será un sistema separado ya que las aguas de lluvia se recogen mediante un sistema de canales independientes de los diseñados para las aguas residuales originadas por los diferentes procesos fabriles.

Solución de los efluentes líquidos de los sistemas de limpieza química (Ecuilibradores de ácidos y bases)

Un vez que las corrientes químicas son agotadas se envían a un tanque ecualizador junto con las corrientes de la bioeléctrica del drenaje de residuales de la torre de enfriamiento, el drenaje de agua de planta de tratamiento de agua química y el agua concentrada de la ósmosis inversa.

Los ácidos y bases agotados se mezclan hasta su neutralización. El agua se dosifica de manera paulatina al sistema de tratamiento y la sal que se deposita en el fondo es extraída y puesta a secar por autoevaporación, la misma se puede utilizar posteriormente en otro proceso o en formulaciones de pienso para alimento animal. El volumen del colector no debe ser mayor a 100 m³ y el tiempo de retención menor a un día.

Tecnología de autodepuración a través de lagunas

El sistema de tratamiento se basa en la autodepuración, a través de procesos de biodegradación anaeróbicas y aeróbicas de los componentes orgánicos provenientes del residual contaminante con elevada carga orgánica. Considerando alto contenido de compuestos orgánicos, en los efluentes azu-

careros y las condiciones ambientales que favorecen la autodepuración, se ha seleccionado desde el punto de vista técnico – económico un sistema de tratamiento facultativo consistente en una laguna de estabilización o regar el residual luego de ser homogenizado.

Las lagunas de estabilización de aguas residuales permiten la reducción de agentes patógenos sin la necesidad de la cloración y la previa clarificación en plantas convencionales de tratamiento. Este efecto se puede lograr con más de una laguna de estabilización trabajando en serie.

Se propone los siguientes sistemas de tratamiento de los residuales:

Propuesta 1: Tratar los residuales mediante el uso de laguna de estabilización, para luego ser empleados en el fertirriego de plantaciones.

Listado de equipos tecnológicos fundamentales y sus especificaciones

- Un separador de sólidos.
- Una cámara desarenadora con su rejilla de protección.
- Una trampa de grasa.
- Un tanque ecualizador.
- Dos lagunas facultativas.
- Dos registradores indicadores de flujo, rango: 5 – 40 m³/h de tipo electromagnético (para evitar contacto directo con el fluido).

Balances de materiales, características de las corrientes residuales y flujo tecnológico del sistema

Para la realización del balance de materiales de las aguas residuales en el ingenio, se consideró la información brindada por la industria y la caracterización de los residuales. En la tabla 5 se muestran los valores de flujo de residuales determinados en las zanjas internas del central.

Tabla 5. Flujo de residuales para ser tratados en lagunas

	Flujo de residual (m³/d)
1. Residual del central a tratar en laguna	6750
2. Residual de la bioeléctrica que se une al central	1680
Total	8430

En la tabla 6 se muestra la caracterización del residual generado por la entidad en los diferentes puntos de muestreo.

En la tabla 7 se muestra resumido los resultados que se utilizan para el trabajo de diseño de las lagunas del residual final del ingenio (caudal y deman-

Tabla 6. Caracterización de los residuales en diferentes puntos de muestreo

Parámetros	Unidad de medida	Residual del Central	Residual de la destilería	Residual de la bioeléctrica
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	mg/l	15485	56049	30,2
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	mg/l	5043	23077	15
pH	-	4,63	4,20	≈ 6-8
(T °C)	°C	21,5	21,2	20,9
CE	μS/cm	1500	9200	
(T oC)	°C	21,8	21,7	21,5
Nitrógeno total	mg/l	0,26	0,37	
Fósforo	mg/l	23,4	15,5	

Tabla 7. Características del efluente del ingenio + bioeléctrica

Residual final	Caudal (m ³ /d)	DBO (mg/l)	Carga Orgánica (kg/d)
Efluente del ingenio + bioeléctrica	8430	4044	34090

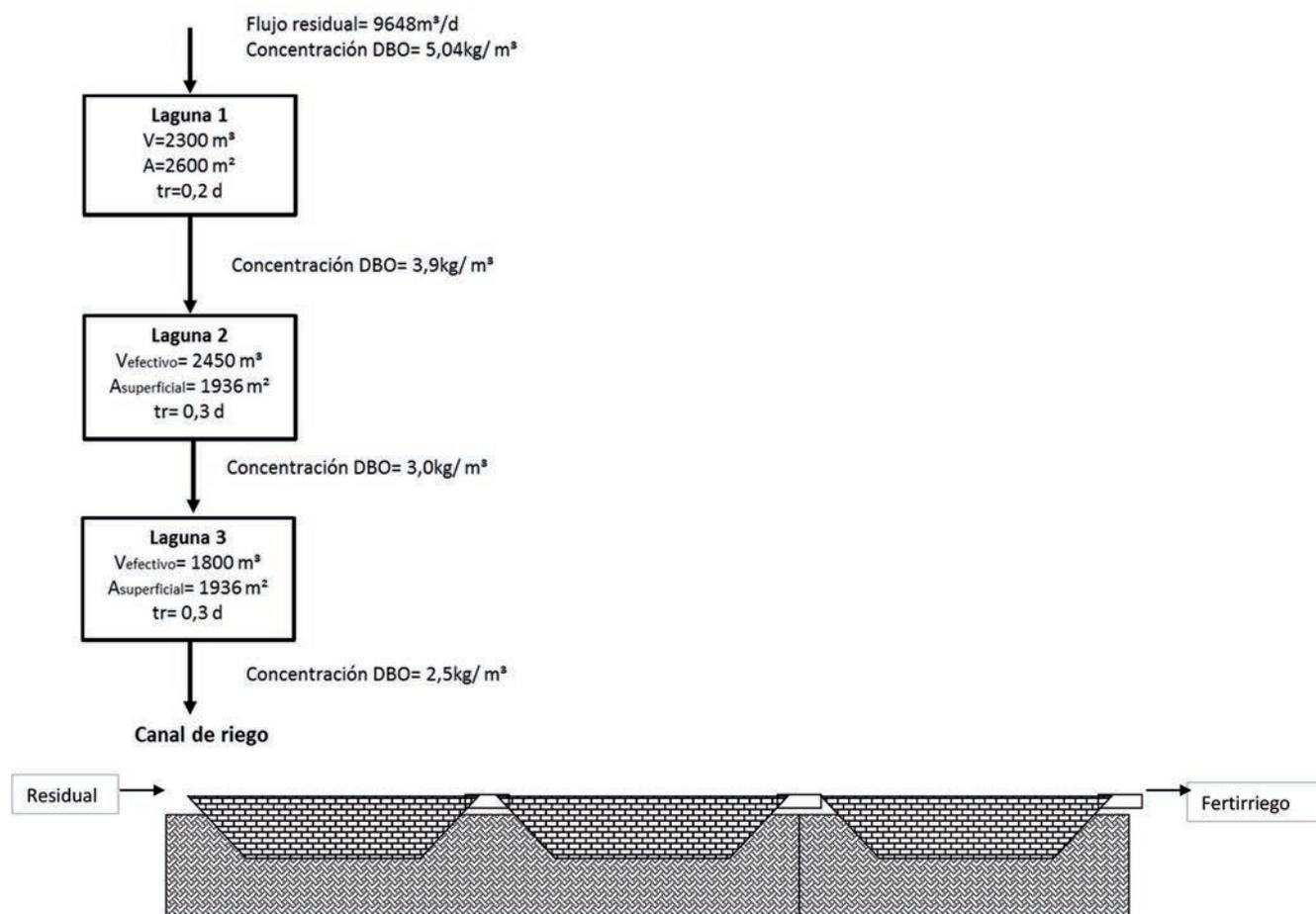


Figura 1. Diagrama del sistema de tratamiento de residuales.

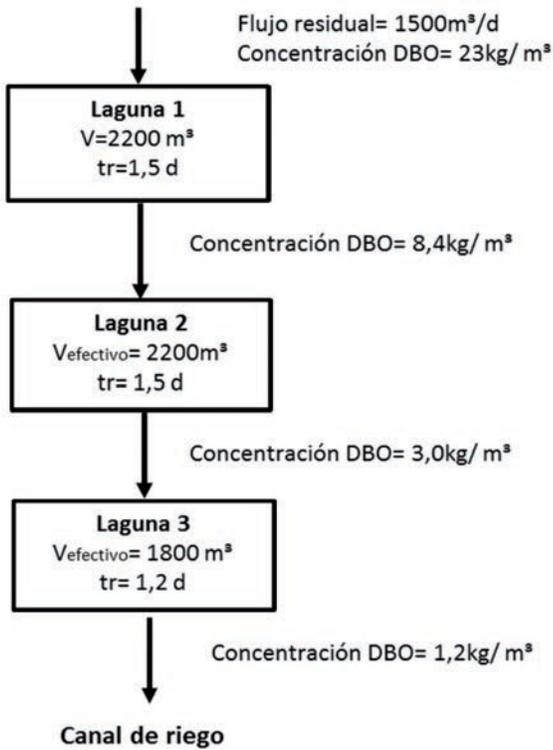
da biológica de oxígeno). En este caso se evaluó la conveniencia de mantener el actual sistema para la depuración del residual ingenio + bioeléctrica. Se utilizó metodología informada por [2].

En la tabla 8 se muestra resumido los resultados

que se utilizan para el trabajo de diseño de las lagunas del residual final de la destilería (caudal, demanda biológica de oxígeno y carga orgánica). En este caso sería necesario la construcción de un nuevo sistema de lagunas.

Tabla 8. Características del efluente de la destilería

Residual final	Caudal (m ³ /d)	DBO (mg/l)	Carga Orgánica (kg/d)
Efluente de la destilería	1500	23077	34615



En esta variante se dispondrá de:

Residual final	Caudal (m ³ /d)	DQO (kg/m ³)
Efluente de las lagunas central + bioeléctrica	9600	5
Efluente de las lagunas destilería	1500	2,8

Propuesta 2: Emplear los residuales de la destilería para la producción de biogás

La proyección actual de la Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar indica una tendencia a encontrar métodos de tratamientos que den mayor aprovechamiento a los residuales con la obtención de subproductos de mayor utilidad, tanto para la industria como para la sociedad. El tratamiento para combatir la contaminación en lo referente a la vinaza no debe ser una carga económica para la destilería sino por el contrario la vía de obtener un producto con valor comercial, cuya venta le permita un ingreso extra de los que tradicionalmente obtiene, así como una reducción de las erogaciones que por concepto de vertimiento de aguas residuales o multas se deben hacer. Las vinazas pueden ser la materia prima para otros procesos fermentativos como

la producción de biogás de manera que además de la protección del medio ambiente, se obtenga biogás que pueda ser quemado en la propia caldera de la destilería.

Biogás

El biogás tal como se genera es combustible, siendo el metano el que le da las cualidades energéticas.

Algunos resultados tecnológicos esperados son los siguientes:

- Carga contaminante de los mostos a la entrada del proceso 56 kg DQO/m³.
- Carga contaminante a la entrada del reactor 20 kg DQO/m³.
- Carga contaminante del afluente del proceso 6 kg DQO/m³.
- Eficiencia de remoción de la carga contaminante 70 %.
- Rendimiento de Biogás 0,45 NM³/kg DQOremov.
- Rendimiento de Lodo 20 kg/m³ de mosto.
- Composición del Biogás (vol,)
 - CO₂ : 38 %
 - CH₄ : 60 %
 - SH₂ : 2 %
- Características del lodo biofertilizante:
 - Nitrógeno 2,27 kg/t lodo.
 - Potasio (K₂O) 0,03 kg/t lodo.
 - Fósforo (P₂O₅) 0,10 kg/t lodo.

La vinaza sale de la columna a una temperatura de 100 °C, pH 4,3 y 52 kg/m³ de DQO. Para lograr estas condiciones se pueden utilizar los intercambiadores de calor mosto/batición, que reduciría su temperatura. Otro medio refrigerante, agua o aire, llevaría esta hasta el límite deseado. La recirculación hasta de un 40 % del líquido efluente, la mezcla con las aguas residuales del Central y el uso de cal, permitirán llegar a las condiciones de pH y concentración requeridas.

El monto de la inversión de la Planta de Biogás es de aproximadamente 3 millones, el cual incluye montaje e instalación.

Para un residual de la destilería de 1700 m³/d representan un vertimiento diario a las lagunas de cerca de 78 toneladas de materia orgánica. Si se considera 70 % de eficiencia de remoción en dicho sistema, es posible que se produzcan 24000 m³ de biogás por día. La producción de Bioelectricidad a partir del biogás producido anualmente tomando como índice de generación 1,7 kW.h/m³ genera 12000 MW.h.

El residual que sale de la planta de biogás, por su volumen y su carga orgánica pudiera unirse a la corriente residual ingenio + destilería y tratarse en el sistema de lagunas existentes. En ese caso, la concentración de la DQO de salida de la tercera laguna estaría próxima a 5 kg/m³.

En esta variante se dispondrá de:

Residual final	Caudal (m ³ /d)	DQO (kg/m ³)
Efluente de las lagunas central + bioeléctrica + destilería	11000	4,7

Si se comparan las características de las aguas de salida del sistema de tratamiento en lagunas [3] por cualquiera de las dos propuestas con las normas cubanas de vertimiento de residuales (NC 27: 2012) se observa que se superan los límites permisibles de materias orgánicas para su vertimiento a ríos y embalses (categoría B; DQO < 90 mg/L y DBO < 40 mg/L). También se superan los límites de concentración de nitrógeno y fósforo, el pH y la conductividad eléctrica (concentración de N < 10 mg.L⁻¹; concentración de fósforo < 4 mg.L⁻¹, 6 < pH < 9 y conductividad eléctrica < 2000 µS.cm⁻¹).

La utilización de aguas residuales como agua de riego y fertilización de la caña, dado el contenido de potasio y otros nutrientes que estas poseen tiene sus antecedentes en las experiencias brasileras con el riego de las vinazas y se rige en Cuba por la norma cubana NC 855: 2011. La aceptación de las aguas residuales en el fertirriego se determina por el cumplimiento de los parámetros reportados en la norma NC 855:2011 cuyos criterios de evaluación se presentan en la tabla 9.

En lo referente al pH los residuales de la industria, como promedio, se clasifican como “malos” a no ser que se adopten acciones correctivas para esta variable. A los efectos de fertirrigar, el DQO y DBO deben estar por debajo de los 5000 mg/l para el primer caso y 2500 mg/l para el segundo. Este parámetro es cumplido en cualquiera de las dos propuestas. Notar que debe evaluarse la relación DQO/N, que da una medida de la razón del nitrógeno con el carbono (C/N), como indicador de equilibrio del fertilizante y para evitar procesos de mineralización del nitrógeno [4].

Disposición final de los residuales

Como disposición final del efluente se propone su

uso como fertilizante en plantaciones fundamentalmente la caña de azúcar. Es importante que la fábrica cuente con posibilidades para mejorar la calidad del efluente, los cuales podrían ser aprovechados en algunos casos sólo con medidas organizativas, mientras que en otros sería necesario realizar inversiones. Tal es el caso de la programación adecuada de los períodos de limpieza y la utilización del menor volumen posible de agua en la limpieza de equipos y locales, evitar la deposición de cachaza en la zanja que aumenta la carga orgánica del efluente, la concentración de sólidos en los canales y las lagunas y disminuye el volumen útil de los sistemas de depuración, construir trampas de grasas en todas las salidas de residuales y darles mantenimiento periódico, entre otras medidas que contribuyen a un efluente de mayor calidad para su tratamiento.

Criterios sobre la puesta en marcha de las lagunas

Para la puesta en marcha de las lagunas se debe comenzar a llenarlas con agua limpia hasta alcanzar la mitad del nivel de operación con 15 días o más de anticipación antes de comenzar la zafra. Sería recomendable la introducción en la primera laguna lodo residual con el objetivo de proporcionar cierta cantidad microorganismos que inicien el tratamiento biológico.

Operación, mantenimiento y control

Las lagunas tienen requerimientos operacionales y de mantenimiento mínimo que, sin embargo, deben revisarse y cumplirse periódicamente, por el operador, con el objeto de eliminar problemas que frecuentemente se presentan en este tipo de plantas. Para el mantenimiento del sistema de tratamiento se realizan las siguientes tareas:

- Mantenimiento de las áreas verdes aledañas a las lagunas.
- Eliminación de sólidos flotantes en las lagunas.
- Limpieza de una vez por semana de la cámara desarenadora, rejilla de protección y separadores de hidrocarburos.
- Mantenimiento sistemático de los equipos de medición, así como válvulas y accesorios.

Tabla 9. Criterios de evaluación para las aguas residuales que se utilizarán en el riego

Criterios	Conductividad eléctrica (CE) mmhos/cm	Sales solubles totales (SST) mg/kg	Relación de absorción de sodio (RAS)	pH
Buena	< 1,50	< 900	< 4	6-7
Regular	1,50-1,80	960-1150	4-7	5-6 o 7-7,8
Mala	1,80-2,40	1150-1530	7-10	4-5 o 7,8-8,4
No se puede utilizar	>2,40	> 1530	>10	< 4 o > 8,4

1 mmhos/cm = 1 mS/cm.

e) Mantenimiento general al final cada zafra, reparación y limpieza.

Debe tenerse en cuenta que aunque los requerimientos de operación y mantenimiento son muy

simples, la no ejecución sistemática y correcta de las medidas de explotación y mantenimiento del sistema pueden disminuir significativamente los resultados esperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. González M., Informe técnico "Estudio para la caracterización de residuales de la UEB Azucarera Jesús Rabí", No. 12, Empresa de aprovechamiento hidráulico, Abril de 2017, Matanzas.
 2. Menéndez, C. and M. Díaz (2009). Lagunas, diseño, operación y control. La Habana, Cuba, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.
 3. Sáenz, R. (1992). Predicción de la Calidad del Efluente en Lagunas de Estabilización., Washington, D.C. Textos completos.
 4. ICIDCA (1982), Informe técnico. "Algunas consideraciones para la caracterización de las aguas residuales y la evaluación de los sistemas de lagunas de tratamiento en la industria azucarera".
-