



[Vuelve al índice](#)

---

# USO DEL AGUA Y LA ENERGIA EN INGENIOS AZUCAREROS/ALCOHOLEROS

**C. Durán**

**Facultad de Química, UNAM, México**

**A. Noyola**

**Instituto de Ingeniería, UNAM, México**

**H. Poggi**

**Cinvestav-Zacatenco, IPN, México**

**L.E. Zedillo**

**IMPA-Azúcar, S.A. - Geplacea, México**

---

1 Los autores reconocen la asistencia logística y financiera proporcionada a este proyecto por Delegación Huastecas de Azúcar, S. A. y por el Ingenio Alianza Popular.

---

## RESUMEN

*Los ingenios azucareros consumen cantidades considerables de agua durante el procesamiento de la caña de azúcar. Por otro lado, cuando se emplean las mieles incristalizables resultantes como sustrato para la producción de etanol por métodos biológicos, se emplean también procesos que requieren de consumos energéticos considerables. Asimismo, durante el proceso, se requiere de cantidades considerables de energía, las cuales son no solamente proveídas por la combustión del bagazo generado como subproducto, sino de fuentes fósiles de energía.*

*Se ha iniciado un proyecto interinstitucional para resolver esta problemática. Este estudio a nivel piloto se ha enfocado, como un primer paso al estudio del tratamiento anaerobio-aerobio de las aguas residuales provenientes de las torres de destilación de los mostos fermentados para concentrar la corriente alcohólica de 10 a 96% en volumen de etanol. Dentro de este tratamiento se contempla la recuperación energética del gas metano obtenido del tratamiento anaerobio para su uso como una fuente no convencional de energía, la recuperación de la fase sólida para su uso como fuente no convencional de alimentos para especies acuícolas y el reuso del agua tratada como agua de riego.*

*La planta piloto procesa 3 metros cúbicos por día de aguas residuales y compara el comportamiento de tres tipos de reactores anaerobios (manto de lodos, reactor empacado de flujo ascendente y descendente y reactor de lecho fluidificado o fluidizado). Los efluentes pretratados en el sistema anaerobio se someten a un sistema aerobio de discos rotatorios para convertir la materia orgánica en biomasa microbiana rica en proteína (de 15-25% en base seca, medida como nitrógeno Kjeldahl con un factor de 6.25).*

*Los resultados obtenidos indican que el sistema, si se aplicara a tratar todas las aguas residuales generadas en las alcoholeras del país, puede producir metano con una energía equivalente a proximadamente 15 mil metros cúbicos de combustóleo al año y de 85 mil toneladas de biomasa húmeda al año (con una humedad entre el 80 y 90%).*

---

## INTRODUCCION

La agroindustria azucarera es una de las cinco más contaminantes de las cuencas acuíferas del país. También es una de las que ofrece mayores empleos anualmente y aprovechan de manera más eficiente la energía solar. Sin embargo, hasta el momento, no se ha dado una política audaz del uso de sus productos y subproductos que la hagan una agroindustria rentable y competitiva a nivel mundial. Tampoco se han implantado sistemas de control del consumo energético que garanticen por un lado el uso eficiente del bagazo (actual fuente principal de energía) y por el otro la disminución de la contaminación ambiental.

Para la producción de azúcar y alcohol de caña, que son básicamente los únicos productos actualmente usados de este recurso, se requiere de la utilización de enormes cantidades de agua, que superan el millón de metros cúbicos por día y de energía, que proviene principalmente de la combustión (generalmente ineficiente) del bagazo y de combustibles fósiles de baja calidad (con altos contenidos de azufre). En la fabricación de azúcar se desechan las aguas que provienen del lavado de la caña, de la clarificación del jugo conocidas como cachazas), de la limpieza de los evaporadores, calentadores y purgas de calderas, de los sistemas de enfriamiento y de los servicios sanitarios. En la producción del alcohol etílico se tienen como desechos las aguas de enfriamiento de condensadores y tinajas de fermentación, los fondos de éstos y las vinazas o residuos de las torres de destilación. El consumo energético no es optimizado en la mayor parte de las plantas alcoholeras.

De todas las aguas residuales provenientes de los complejos azucareros/alcoholeros, las que son más contaminantes por su concentración de material orgánico biodegradable y no biodegradable son las vinazas, que se producen en una proporción de 12 a 15 litros por cada litro de alcohol destilado. Por su volumen, aún cuando la concentración de materia orgánica e inorgánica no sea tan alta, las aguas de lavado de la caña son casi tan contaminantes como las vinazas. Existen también aguas provenientes de condensadores y otros sistemas de intercambio energético que no son aprovechadas y que contribuyen a disipar calor decrementando la eficiencia energética global del sistema y contaminando el ambiente.

Para disminuir estos graves problemas de contaminación se han establecido estrategias, haciendo uso principalmente de sistemas biotecnológicos, para lograr alcanzar la meta de cumplir con las normas técnicas ecológicas vigentes en lo que a efluentes líquidos se refiere. No existen hasta el momento limitantes para la disipación de calor al ambiente pero no es de dudarse que en el futuro próximo se reglamente al respecto.

En 1986 se planteó en México un proyecto de investigación multidisciplinario y multi-institucional que contempla el tratamiento de los efluentes líquidos de un ingenio azucarero, seleccionado como prototipo, empleando como primer efluente líquido en estudio las aguas residuales generadas en las torres de destilación de alcohol. Los sistemas usados fueron tanto anaerobios como aerobios.

Entre los primeros están dos reactores anaerobios de manto de lodos de flujo ascendente, conocidos con sus siglas en inglés como UASB (upflow anaerobic sludge blanket), uno de 5000 litros y otro de 120 litros. Además se cuenta con dos de ellos a nivel de laboratorio. Se tiene también un sistema de tres reactores anaerobios empacados de 280 litros, dos operando con flujo ascendente y un tercero operando con flujo descendente. Finalmente, se tiene un reactor de lecho fluidificado o fluidizado de 300 litros. A escala de laboratorio se tienen otros dos sistemas similares.

Para los reactores aerobios se tiene un equipo piloto de discos rotatorios de 3000 litros y tres de laboratorio de 20, 50 y 250 litros. Se opera también un sistema de lecho fluidificado aerobio de escala laboratorio.

Finalmente, se tiene un sistema de cuatro lisímetros de laboratorio rellenos con tierra de la región con objeto de estudiar el efecto de las aguas residuales en estudio sobre ella.

Las instituciones de educación superior e investigación que participan en este proyecto son la Facultad de Química de la UNAM, a través de su Programa de Ingeniería Química Ambiental y Química Ambiental, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, a través de su Coordinación de Ingeniería Ambiental, el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, a través de su Departamento de Biotecnología y Bioingeniería, el Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí y el Departamento de Fuentes no Convencionales de Energía del Instituto de Investigaciones Eléctricas. La empresa Azúcar S.A., a través del Instituto para el Mejoramiento de la Producción Azucarera y de su Delegación Huastecas, así como el Ingenio Alianza Popular, financiaron esta investigación, contando con la contraparte financiera institucional de cada una de las entidades de educación superior e investigación.

Los objetivos globales de este proyecto son:

- Establecer uno o varios arreglos de los sistemas de tratamiento que permitan depurar las aguas residuales al mínimo costo posible.
- Estudiar la instrumentación real del o de los arreglos que permitan su construcción, arranque y operación con los medios humanos y materiales disponibles.
- Desarrollar investigación básica con experimentos a escala de laboratorio que permita simular el comportamiento de los sistemas y establecer parámetros cinéticos para su escalamiento.



## Equipos

Los equipos usados ya han sido descritos en la literatura (Durán de Bazúa *et al*, 1988; 1990; 1991) por lo que solamente se presenta el diagrama de bloques general de la planta piloto y el flujo de las aguas residuales para esta segunda corrida (Fig. 1). Las condiciones de operación de los reactores se mantuvieron idénticas a las que se tuvieron en la primera corrida de los experimentos en serie (Durán de Bazúa *et al*, 1990).

Los lisímetros usados fueron tubos de teflón de 10 cm de diámetro y 1.25 m de altura, llenos con suelo de la región. El riego alimentado a cada uno de ellos fue de 112.2 mL por día, con excepción de uno de ellos que se alimentó con el 50% de este volumen (56.1 mL/d). El primero, usado como control, recibía solamente agua de la llave y los otros tres vinazas sin tratar y efluentes del sistema anaerobio de lecho fluidificado (100 y 50% de la cantidad alimentada a los primeros dos lisímetros).

## Métodos analíticos

Los métodos analíticos usados son los recomendados por la AOAC (1970) y la APHA (1985). Muestras de licor mezclado de todos los reactores fue usado para medir sólidos totales, disueltos y suspendidos (AOAC, 1970). Las muestras fueron después centrifugadas y el sobrenadante usado para determinar demanda química de oxígeno (APHA, 1985) y demanda bioquímica de oxígeno empleando un respirómetro Voith-Sapromat (Durán de Bazúa *et al*, 1988).

Muestras de biopelícula de los discos del reactor aerobio fueron analizadas por gravimetría para determinar peso seco y cenizas y por el método de Kjeldahl para determinar nitrógeno y extracto etéreo por el método de Soxhlet (AOAC, 1970).

Para los sistemas anaerobios se determinaron sulfatos así como ácidos orgánicos (Durán de Bazúa *et al*, 1988; Poggi *et al*, 1987).

## RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis global de las vinazas presenta diferencias significativas entre las vinazas obtenidas de la fermentación de un caldo cuya fuente de carbón era el azúcar estándar rechazada y las obtenidas a partir de malezas (Tabla 1). De hecho, esos datos indicarían la presencia de un agua residual incluso más manejable desde el punto de vista de su degradación biológica anaerobia, con excepción del pH que presenta un valor sumamente bajo. Sin embargo, los resultados obtenidos en la planta piloto indicaron que la biodegradación no fue la esperada. A continuación se presentan los resultados, tanto en los experimentos en los que se usaron los lotes de vinazas obtenidos de la fermentación de azúcar estándar, como los de las obtenidas a partir de malezas mezcladas con azúcar estándar. Se discuten también estos resultados y se plantea la estrategia para el resto de la zafra.

**Tabla 1**

**Características físico-químicas de los lotes de vinazas obtenidos a partir de azúcar mascabado y melazas**

	Azúcar de rechazo	Melazas
--	-------------------	---------

Temperatura, k	343	343
pH	3.7	4.3
Demanda química de oxígeno, mg/L	35,000	70,000
Acidos orgánicos volátiles, mg/L	8,963	10,824
Sólidos totales, mg/L	24,695	66,043
Sólidos totales volátiles, mg/L	17,000	45,000
Sólidos totales fijos, mg/L	7,700	21,500

## Sistemas anaerobios

La principal diferencia con la primera corrida fue la disminución estadísticamente significativa de la eficiencia de depuración de los tres sistemas estudiados. Esta disminución puede atribuirse a las sustancias extrañas presentes en las vinazas procedentes del propio lote de azúcar contaminada. De hecho, al establecer contacto con el área de producción de la planta de alcohol se encontró que la misma problemática se tuvo durante la fermentación con levadura, la cual generó problemas en el rendimiento alcohólico de las fermentaciones.

Cabe mencionar que, al observarse este fenómeno se modificaron las adiciones de azúcar de rechazo a las tinajas de fermentación y se llevaron a un mínimo, reiniciando la alimentación de malezas para minimizar la concentración de estas sustancias extrañas e impedir que afectaran negativamente la fermentación.

Consecuentemente, los reactores anaerobios mejoraron su eficiencia de depuración pero no rebasaron los valores obtenidos en la primera corrida, sino que los mantuvieron (entre 68 y 73% de eficiencia de depuración media la materia orgánica soluble como demanda química de oxígeno).

La producción de biogás también alcanzó nuevamente los niveles obtenidos en la primera corrida (entre 0.9 y 1.3 litros de gas por litro de volumen de reactor por día). Estos datos indican que los resultados obtenidos en las dos zafas anteriores sobre la fuente energética probable del biogás siguen siendo válidas. La capacidad calorífica del metano contenido en él, comparada con las del combustóleo que es el energético usado en los ingenios azucareros/alcoholeros, además de la combustión del bagazo húmedo, arrojó un equivalente a aproximadamente 15 millones de metros cúbicos de combustóleo o 600 millones de megaJoules anuales (Durán de Bazúa *et al*, 1988).

Puede concluirse que, aunque los sistemas anaerobios son resistentes a choques de pH y carga orgánica, no lo son tanto a la presencia de sustancias extrañas, como las que se encontraban presentes en el azúcar de rechazo que, probablemente, fueran algún tipo de biocida.

## Sistemas aerobios

El reactor de biodiscos aparentemente no resintió la presencia de estos compuestos químicos extraños ya que la eficiencia de remoción de la materia orgánica remanente en las aguas tratadas anaerobiamente no experimentó cambios significativos con respecto de la primera corrida, que estuvo entre 50 y 65%, medida como demanda química de oxígeno (Durán de Bazúa *et al*, 1990).

Naturalmente que existe la posibilidad de que dichas sustancias fueran parcialmente modificadas por los bioecosistemas anaerobios y, por ende, que no se presentaran de manera tóxica en el efluente que se alimentaba al reactor.

No se han hecho análisis de las biomásas, tanto anaerobias como aerobias, para verificar este aserto. Dado que el lote de azúcar de rechazo está ya terminado se espera que dicha situación no vuelva a repetirse.

La experiencia de esta corrida es que debe evitarse la presencia en la planta de alcohol de cualquier sustancia que pueda tener características biocidas, no solamente por la problemática generada en la planta de tratamiento biológico de las aguas residuales, sino por el sistema de fermentación con *S. cerevisiae* que produce el etanol.

## Lisímetros

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos durante un lapso de siete meses y, dado que esta fase experimental se encuentra en su primera etapa, los resultados no son concluyentes. Se analizarán posteriormente los suelos que han sido recolectados de los lisímetros por estratos y los percolados que se conservaron congelados. También se plantea para la segunda etapa experimental el empleo de los efluentes de los sistemas aerobios para corroborar si el lixiviado ya cumple con la normatividad existente a nivel mundial y que, muy probablemente, será implantada en México en el futuro cercano.

**Tabla 2**  
**Experimentos en lisímetros a escala de laboratorio**

Lisímetros influente	DQO percolado mb/L	% remoción	volumen final percolado	
			L/d	
1 control	0	0	0	19.0
2 (112.1 mL vinaza/d)	61,500	8,180	87.0	27.0
3 (112.1 mL efluente/d)	27,594	5,946	78.0	61.0
4 (56.1 mL efluente/d)	29.212	3,843	87.0	18.6

## ESTRATEGIA PARA LOS PROXIMOS EXPERIMENTOS

Dado que la zafra 1990-91 terminará hasta agosto de 1991 se continuarán los experimentos para determinar la máxima eficiencia de remoción de los sistemas anaerobios conectados con los sistemas aerobios en serie y éstos con los lisímetros. Esto permitirá definir el sistema a usar en las plantas de alcohol etílico para tratar sus efluentes de las torres de destilación evaluando económica y energéticamente el sistema seleccionado. El siguiente paso será la construcción de una planta prototipo que tenga un volumen de trabajo de diez a veinte veces mayor que el de la planta piloto (30 a 50 metros cúbicos por día) con la que puedan ya evaluarse materiales de construcción, sistemas monitorios y de control, recuperación de subproductos (biogás, biomasa y agua tratada) y costos de operación, lo que

dará ya el dimensionamiento de una planta de tratamiento para vinazas y su costo real (inversión y operación).

## REFERENCIAS

DURAN DE BAZUA, C.; MEDELLIN, P.; NOYOLA, A.; POGGI-VARALDO, H. Y ZEDILLO, L. E., Caracterización de vinazas y su degradación en un sistema combinado de tres reactores anaerobios y un reactor aerobio de biodiscos. **Tecnol. Ciencia Ed IMIO**, 3(2), 1988, 33-43.

DURAN DE BAZUA, C.; GONZALEZ, S.; MEDELLIN, P.; NOYOLA, A.; POGGI-VARALDO, H.; Y ZEDILLO, L. E., Retos a la industria azucarera para la próxima década: Reaprovechamiento de sus aguas residuales a través de su degradación biológica para obtener biogás y biomasa microbiana. **Memoria del XVI Congreso**. Pub. Academia Nacional de Ingeniería, A.C. pp. 34-39. Sept. 19-21. Querétaro, Qro., México, 1990.

DURAN DE BAZUA, C.; NOYOLA, A.; POGGI, H. Y ZEDILLO, L. E., Biodegradation of process industry wastewater. Case problems: Sugarcane industry. En **Biological degradation of wastes**. Ed. A. M. Martin. Cap. 17. Elsevier Sci. Pub. Ltd. Londres, Inglaterra, 1991.

ZAMANO-PEREZ, A. H.; ZEDILLO-PONCE-DE-LEON, L. E. Y DURAN-DOMINGUEZ-DE-BAZUA, C., Tratamiento biológico de aguas residuales de la industria alcohólica a partir de malezas de caña de azúcar. Informe técnico de trabajo VIN-01-90. Pub. Facultad de Química, UNAM 100 pags. México D. F., México, 1991.



[Vuelve al índice](#)

---